熊本大学学術リポジトリ

Kumamoto University Repository System

Title	チタン金属の超精密切削加工に関する研究
Author(s)	篠崎，烈
Citation	
Issue date	2007-09-25
Type	Thesis or Dissertation
URL	http://hdl.handle.net/2298/11061
Right	

Kumamoto University

チタン金属の超精密切削加工に関する研究

2007年9月

熊本大学大学院 自然科学研究科

篠崎 烈

目　次

第１章　序　　論

1.1 超精密切削加工技術の動向 1
1.2 難削材に対する超精密切削加工の意義と現状 5
1.3 本論文の研究目的と構成 10
参考文献 12

第２章　バイト材種が超精密切削仕上面粗さに及ぼす影響

2.1 緒　言 14
2.2 実験方法および加工条件 15
2.3 実験結果および考察 17
2.3.1 各種バイトによるチタン合金の超精密切削加工 17
2.3.2 コーティングバイトによる各種チタン金属の超精密切削加工 25
2.3.3 成形コーティングバイトによる仕上面粗さの向上 27
2.3.4 各種バイトによる超精密切削仕上面粗さの比較 29
2.3.5 コーティングバイトによる超精密切削仕上面生成機構の検討 34
2.4 小　括 37
参考文献 38

第３章　工具切込み量が超精密切削仕上面粗さに及ぼす影響

3.1 緒　言 39
3.2 実験方法および加工条件 40
3.3 実験結果および考察 42
3.3.1 前加工における工具切込み量が仕上面粗さに及ぼす影響 42
3.3.2 仕上加工における工具切込み量が仕上面粗さに及ぼす影響 47
3.3.3 各種チタン金属の超精密切削仕上面粗さの向上 57
3.4 小　括 60
参考文献 61

第４章　低切削速度が超精密切削仕上面粗さに及ぼす影響

4.1 緒　言 63
4.2 実験方法および加工条件 64
4.3 実験結果および考察 65
4.3.1 超精密切削加工に及ぼす切削速度の影響と効果 65
4.3.2 極低切削速度における超精密切削仕上面粗さと工具摩耗の検討 68
4.3.3 極低切削速度における工具切込み量が超精密切削加工に及ぼす影響 72
4.4 小　括 76
参考文献 77

第５章　ダイヤモンドバイトによる低切込み超精密切削加工の検討
5.1 緒　言 78
5.2 実験方法および加工条件 79
5.3 実験結果および考察 80
5.3.1 低切込み超精密切削加工によるダイヤモンドバイト工具寿命の検討 ... 80
5.3.2 超精密切削仕上面粗さに及ぼす工具送り量の影響 84
5.4 小　括 90
参考文献 91

第６章　チタン合金に対する超精密非球面金型加工の試み
6.1 緒　言 93
6.2 実験方法および加工条件 94
6.3 実験結果および考察 97
6.3.1 コーティングバイトによるチタン合金非球面超精密切削仕上面 97
6.3.2 非球面超精密切削加工による工具摩耗の影響 99
6.4 小　括 101
参考文献 102

第７章　総　　括
7.1 本研究の成果と概要 103

謝　　辞

論文中の用語および記号

【使用記号】	【日本語表記】	【英語表記】	【単位】
D	加工物直径	Work piece diameter	mm
d	工具切込み量	Depth of cut	μm
F_t	主分力	Principal cutting force	N
F_n	背分力	Thrust cutting force	N
f	工具送り量	Feed rate	μm/rev
Hr	工具送り方向仕上面粗さ	Surface roughness in cutting direction	nm(Rz)
Hra	算術平均仕上面粗さ	Arithmetical mean surface roughness	nm(Rz)
$Hr_{(cut)}$	切削方向仕上面粗さ	Surface roughness in cutting direction	nm(Rz)
$Hr_{(3D)}$	3 次元仕上面粗さ	3D surface roughness	nm(Rz)
$Hr_{(tool)}$	工具刃先稜粗さ	Surface roughness of cutting edge in radial direction	nm(Rz)
Kb	逃げ面摩耗増加率	Increase rate of flank face wear	μm/m
L	切削距離	Cutting length	m
N	主軸回転数	Spindle speed	rpm
t_c	切りくず厚さ	Chip thickness	μm
Tw_{cr}	臨界削り代	Critical cutting allowance	μm
V	切削速度	Cutting speed	m/min
V_b	工具逃げ面摩耗	Flank face wear	μm

第1章　序　論

1.1　超精密切削加工技術の動向

超精密切削加工は，アルミニウム合金や銅合金，プラスチックなどの軟質材料に対して，単結晶ダイヤモンドバイトを用いることで，ナノメートルオーダーの高精度な加工を行うことができる技術として発展してきた[1].

超精密切削加工技術は1940年ごろから欧米を中心として検討され始め[2]，開発の目的は，国によって大きく異なる．開発当初，米国においては，宇宙，軍事といった広い分野への応用を目的としてすすめられた．現在においても同様の目的で行われているために，膨大な開発費や製作費は国家予算でまかなわれている．一方，日本では，そのような需要が極めて少ないために，産業界での応用技術開発を目的として検討がすすめられた．

日本の産業界において，超精密切削加工技術により製造される部品は，**図 1-1** に示すような超精密部品や光学系部品が主である[3]．具体的な製品としては，コンピュータのハードディスク基板，レーザビームプリンタ用ポリゴンミラー，複写機の感光ドラムなどが挙げられる．ポリゴンミラーの製造では，従来のガラスの光学研摩方式に代わり，超精密切削加工により光学的鏡面を得る加工方法が追求され，加工機や工具，高純度材料などに対する要求が高くなった．1990年には，ポリゴンミラーの製品精度において平面度80nm，表面粗さ5～10nm(*Rz*)の鏡面が，大量生産ラインで製作されるようになった[2]．2000年代に入ってからは，カメラ付き携帯電話やディジタルカメラなどの急激な普及，ディジタル家電製品の増加によって超精密切削加工技術を用いた製品が増加している．2005年以降は，薄型液晶テレビやプラズマディスプレイが量産され始め，導光板の大きさの平面に50～250μmピッチの鏡面のV溝を加工するために超精密切削加工技術が多く用いられるようになった[4].

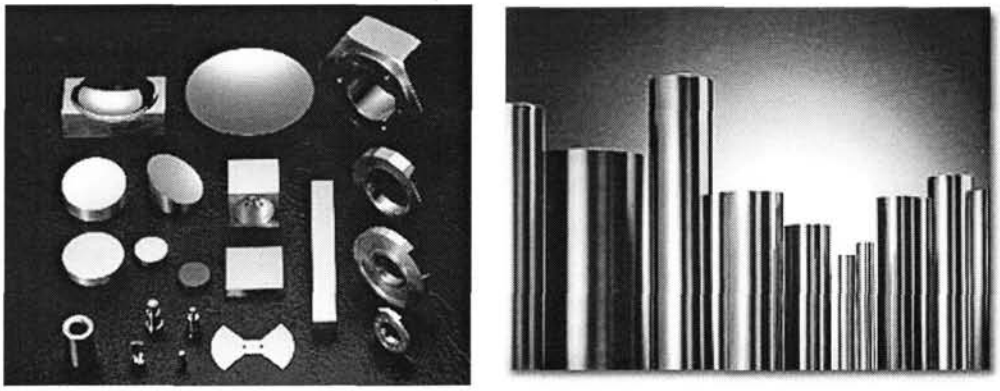


図 1-1　超精密切削加工製品

（左図：超精密切削部品，右図：感光ドラム）

ナノメートルオーダーの加工を行う超精密切削加工技術において，非常に重要な要素の1つである超精密旋盤および関連加工機の開発は，豊田工機㈱や㈱東芝機械などの工作機メーカーを中心として1970年に始まった．1976年に㈱東芝が，球面空気軸受を開発してスピンドル触れ50nmの超高精度の高速回転を実現している．その後，1978年に東芝機械㈱により，球面空気軸受機構を搭載した超精密鏡面加工機が開発された．さらに改良を加えて開発された加工機が，本研究で使用している超精密旋盤ULC-100Aである．**図1-2**に超精密旋盤の概観を，**表1-1**に各種仕様をそれぞれ示す．本装置は，主軸に球面空気軸受機構を搭載しており，高精度な主軸回転特性および十分な機械剛性を実現している．また，X軸およびZ軸は，最小10nmと非常に高い精度の位置決めが可能である．加工に際しては，X軸およびZ軸を2軸同時に動作させることにより，平面のみならず球面をはじめとする3次元形状を形成することができる．さらに超精密加工機の開発がすすみ，1982年には東芝機械㈱がポリゴンミラー加工機，豊田工機㈱が非球面加工用 CNC 超精密ダイヤモンド切削加工機を開発した．同時期には，シャープ㈱や不二越㈱も超精密加工機を開発している[2)]．したがって，各工作機械メーカーによる超精密加工機の開発競争が，超精密切削加工技術の発展に大きく関係していると推測される．

超精密切削加工技術で加工機械とともに重要な要素となるのが，超精密切削加工用工具である．超精密切削加工では，非常に鋭利で耐久性のある単結晶ダイヤモンドを工具材としたダイヤモンドバイトが用いられる．超精密切削加工機の運動を正確に被加工物に転写し，超精密な鏡面加工や非球面加工を行うことが可能な切削工具である．**図1-3**に単結晶ダイヤモンドバイトの刃先を示す．単結晶ダイヤモンドは非常に緻密なダイヤモンド構造であり，その構造を有効に利用することで，非常に鋭利な工具刃

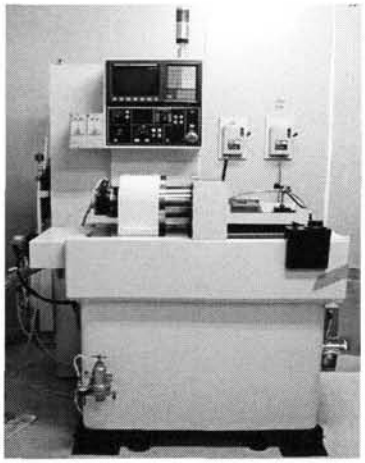


図1-2　超精密旋盤外観
（東芝機械　ULC-100A）

表1-1　超精密旋盤の仕様

Spindle speed	20 - 2,000 rpm
X-axis stroke	150 mm
Z-axis stroke	100 mm
Positioning accuracy	X-axis : 0.01 μm
	Z-axis : 0.01 μm
Movement speed	MAX 2,000 mm/min
Diameter of vacuum chuck	100 mm

先形状を成形できるようになった．現在の技術において，超精密ダイヤモンドバイトの切れ刃真直度は 10nm（切れ刃 1mm 領域），円弧刃の輪郭度（真円度）は 50nm（円弧 90° 領域）であり，ナノメートルオーダーの精度で工具形状が仕上られている [5]．さらに，超精密切削加工において加工精度に大きな影響を与える要因は，工具刃先丸みである．工具切込み量が数マイクロメートルと小さい超精密切削加工では，工具刃先丸みが大きくなると，設定切込みどおりに切りくずが生成せず，切削点ではバニシ作用が生じる．その結果，切削抵抗の増加で仕上面における弾性回復が大きくなり，理論通りに加工することが困難になる．このことから刃先稜線の丸み半径が小さい鋭利な切れ刃が必要とされ，超精密ダイヤモンドバイトの刃先稜線丸み半径は，50nm 以下に仕上げられていることが確認されている [6]．

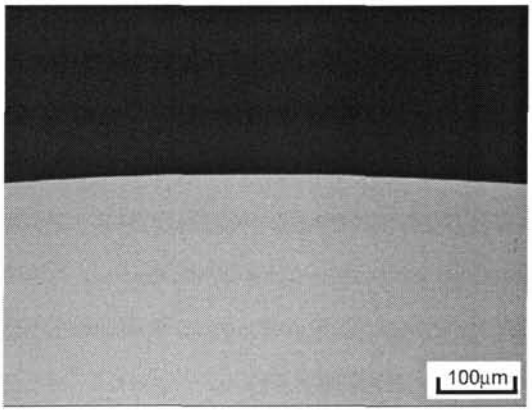


図 1-3　単結晶ダイヤモンドバイト刃先

最近の超精密切削加工においては，単結晶ダイヤモンドバイト以外に，各種材質の工具が検討されるようになった．多結晶体のダイヤモンドバイトや人工ダイヤモンドバイト，さらには，ダイヤモンドを超硬母材にコーティングしたもの（DLC 被膜）などが使用されている．また，サーメットバイトや超硬バイト，各種コーティングバイトなどのスロアウェイ式チップも使用されており，単結晶ダイヤモンドバイトに変わるバイトを検討することで，工具費を安くした低コスト化と高精度仕上面を得るための高精度化を実現できると期待されている．

このように超精密切削加工技術は，最近 30 年程度の間に急速な発展を成し遂げている．超精密旋盤や NC 技術，超精密切削工具などの各種要素が進歩することで，超精密切削加工技術により加工される製品も増加しているのが現状である．従来から，超精密切削加工では，軟質材料に対してダイヤモンドバイトを用いた鏡面加工が行われている．本研究に先立って行われた検討において，アルミニウム合金や無酸素銅などに対する超精密切削加工で，単結晶ダイヤモンドバイトを用いて，仕上面粗さ 10nm (*Rz*)以下という精度が達成されている [7]．

現在，一般的に，超精密切削加工された鏡面高品位部品は，仕上面に無電解ニッケルメッキを施して，さらに研摩加工され，耐久性および製品として必要な特性を向上させて，磁気ディスクや感光ドラム，ポリゴンミラーとして使用されている．特に，近年の薄型液晶ディスプレイにおける超精密切削加工技術は，カラーフィルタの露光装置や光学フィルムへの薄膜の塗工，導光板の射出成形用金型として光を拡散・集光

させるためのプリズム形状の微細溝加工など，幅広い用途で採用されている．導光板用金型には，焼入鋼に無電解ニッケルメッキしたものが用いられ，鏡面のV溝が超精密切削加工技術により加工される[4]．V溝の側面部分では，光の乱反射を最小限に抑えるために，100nm(*Rz*)以下の仕上面粗さが求められている．

さらには，近年の超精密切削加工技術において，単純な平面加工に加えて球面をはじめとする曲面旋削が可能な工作機械が多く利用されている．単純な球面のみならず非球面形状を成形できる加工機が普及したことが，プラスチック射出成形用金型や各種レンズ，ミラーなどの光学製品に対する適用が増加している要因とも推測される．**図 1-4** に，超精密切削加工による加工事例としての非球面レンズおよびプラスチック非球面レンズ用金型を示す．

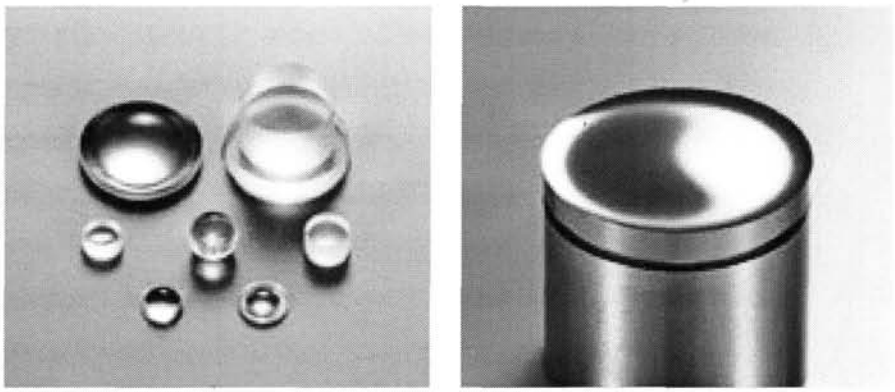


図 1-4　非球面レンズ（左図）および非球面レンズ用金型（右図）[8]

1.2 難削材に対する超精密切削加工の意義と現状

近年の産業界を見ると，精密部品から超精密部品へと，製品に対して求められる精度が着実に高まっている傾向がある．さらには急速な低価格化が進み，より高能率な加工技術の開発が重要な役割を持つようになってきている．特に，エレクトロニクス産業の進歩による電子・光学部品やこれらに関連する金型などに求められる要求は，年々，高くなっている．加えて，金型には，高性能ガラスやプラスチックなどを成形する際の耐熱性や薬品を使用する際の耐食性などを考慮して，チタン金属やステンレス鋼，超硬合金などの難加工材といわれる材料が用いられている．そのため，それらの材料に対する高精度な超精密切削加工技術の開発が求められているのも現状である

最近，特に超精密切削加工技術が活かされているのが，情報分野である．ハイビジョンなどの高画質・高音質番組を長時間録画する次世代 DVD レコーダやハイビジョン画像を再生するパソコン・ゲーム機が広く普及し始めている．DVD は，ピックアップレンズで集光した光スポットを用いてデータの記憶，再生を行っている．より高画質の画像を大容量で記憶するためには，ディスクの記憶密度を高めることが必要となる．そのためには，これまでの技術で用いられている赤色レーザではなく，より波長が短い青色レーザを使用する方がより効果的である [9]．各レーザ光の波長は，赤色レーザで 650nm，青色レーザで 405nm である．波長が短い青色レーザを使用するためには，ピックアップレンズによる集光径を小さくしなければならない．そのため，使用されるレンズの形状は，従来よりも高低差が大きく，さらには，40nm 以下のより高い形状精度が要求される [9]．このようなことから，次世代 DVD レコーダに搭載された DVD ピックアップレンズは，非常に緻密な形状形成を行う加工が求められる．また，ピックアップレンズは，プラスチック射出による成形が行われる．その際に用いられるレンズ金型は，サブミクロンオーダー以下の形状精度が必要となる [10]．

さらに，DVD の普及とほぼ同時に携帯電話や液晶テレビの普及によって，それに使われる導光板やプリズムシートなどの金型加工に対する要求も高くなっている．導光板は，光源からの距離に応じて V 溝の角度や深さを変化させることにより，画面全体を均一に照らすデバイスである．テレビやノート型パソコンなどの液晶ディスプレイは，従来よりも軽量，薄型，省電力化が求められるようになった．そのために導光板の金型は，直線のクロスカットや曲線溝などの複雑形状の超精密切削溝加工が求められるようになった [11]．加えて，それらの溝には，溝深さのばらつきや V 溝斜面の面粗さを小さくすることが要求されている．このように，産業界では，従来の直線や平面の加工に加えて，自由曲面などの複雑形状を，より高精度に超精密切削加工することが求められている．

このように，難削材を用いたナノメートルオーダー精度の超精密部品は，今後増加

することが考えられ，その加工技術の開発が求められている．しかしながら，従来の超精密切削加工技術では，高精度な超精密工作機械とダイヤモンドバイト，切削油剤には灯油を用いて，アルミニウムや無酸素銅，プラスチックなどの比較的加工が容易な軟質材料に対するナノメートルオーダーの加工が行われてきた．これに対して，現在の超精密切削加工技術においては，仕上面粗さで10nm(*Rz*)以下の精度が得られている．材料を構成する原子間隔を0.3nmとすると，原子30個分以下の粗さになる[12), 13)]が，さらに高精度な仕上面粗さを得るための検討も行われている．

一方，チタン金属やステンレス鋼などの難削材に対する超精密切削加工技術は，工業製品に対する高精度・高機能化の要求により，その必要性が年々高まっている．特にチタン金属は，その優れた機械的・化学的性質を活かして，広い分野での利用が期待されている．同時に，加工技術の確立が求められているのも現状である．金型や光学部品，生体部品などの用途において，超精密切削加工による加工技術は，高い形状精度をその加工のみで得られるという点が，他の加工法に対する利点であると考えられる．また，ナノメートルオーダーに平滑化された仕上面粗さを得ることができ，最終仕上面に至るまでの前加工量を減少させることができることも，超精密切削加工の利点の一つであると言える．

軟質材料に対する超精密切削加工では，使用するダイヤモンドバイトの摩耗が小さく，その工具寿命は数百kmにも及ぶと言われている．一方では，機械的・化学的性質に優れるチタン金属やステンレス鋼，インコネル，各種焼入れ鋼などに対する超精密切削加工において，非常に短い切削距離でダイヤモンドバイトの摩耗が大きくなるため，超精密切削加工によるナノメートルオーダーの加工は，非常に困難であるとされている[14)]．難削材に対する超精密切削加工に関する検討[14), 15), 16)]は比較的少なく，いずれの検討結果においても仕上面粗さは，ほとんどがサブミクロンオーダーの議論に留まっており，あまり進展していない．検討された研究のほとんどは，従来から行われている，ダイヤモンドバイトを用いた超精密切削加工という概念の下で検討されており，ダイヤモンドバイトの工具摩耗を小さくすることが試みられている．

この試みの一つとして，楕円振動切削[17)]を用いた超精密切削加工法が挙げられる．この方法では，超精密旋盤に加えて楕円振動装置を設置し，それに固定された工具で超精密切削加工が行われる．ステンレス鋼や鉄系材料などの難削材に対する超精密切削加工において，超精密楕円振動切削の有効性を検討した結果が報告されている[18)]．超硬合金に対する超精密楕円振動切削において，比較的短い切削距離で加工性状が検討されている．工具は単結晶ダイヤモンドバイトを用い，工具切込み量2.5μm，切削速度300m/minという比較的速い加工条件で平面切削されている．加工して得られる仕上面粗さは50nm(*Rz*)であり，非常に良好な仕上面である．しかし，この仕上面粗さ

は切削距離 0.2m におけるものであり，さらに切削距離を 1.3m と長くした場合には 90nm(*Rz*)程度まで悪化している．工具摩耗は，通常の超精密切削加工の場合と比較すると，超音波振動を付加して加工した方が大きくなっている．したがって，加工可能な切削距離が，非常に短いことが問題として挙げられる．高価な工作機械と超音波振動機，およびダイヤモンドバイトを用いた超精密振動切削にも更なる検討が必要とされているのも現状の問題である．

難削材に対して他の付加装置を用いることなく，超精密旋盤のみで超精密切削加工する試みも行われている．脆性材料である単結晶シリコンを単結晶ダイヤモンドバイトで超精密切削加工した事例がある[19]．本報告の特徴は，ノーズ半径が非常に小さなダイヤモンドバイトを用いて超精密切削加工していることである．ノーズ半径 20nm，すくい面の結晶方位は (110)，逃げ面の結晶方位は (100) である．単結晶シリコンは，脆性材料であるため延性モード切削が行われている．加工して得られる仕上面は，工具送り量 0.1μm/rev において，算術平均粗さ 9nm(*Ra*)程度である．0.02μm/rev とさらに小さくすると，算術平均粗さ 5nm(*Ra*)まで向上するという結果が報告されている．

一方，非常に優れた機械的・化学的性質を持ち，今後，高品位部品としての可能性が期待されるチタン金属の超精密切削加工は，近年の需要の高まりにより，超精密切削加工技術の開発が期待されている．しかしながら，チタン金属の超精密加工においては，(1)熱伝導率が低い，(2)断続的に不均一な変形を生じるため，切りくずの生成が不安定である，(3)切削 3 分力において特に主分力および背分力が大きく変動する，(4)切削温度が高温になる，(5)化学反応性が高い，(6)弾性係数が小さいなどの原因により，特にエンドミル加工において，工具寿命が極端に短くなることが指摘されている[20]．このようなことから，研削加工においても良好な仕上面を効率的に得ることは難しいとされている[21]．そこで，先にチタン金属に対して，研削加工で高平滑な仕上面を得る試みについての報告[22]をみてみる．この報告における研削法は，冷凍チャックおよびレジノイドダイヤモンド砥粒#1200 を用いた平面研削である．α-β型チタン合金（Ti-6Al-4V）においては，研削加工で研削方向仕上面粗さ 60nm(*Rz*)程度が得られている．また，純チタンに対しても平面研削加工で鏡面を得る試みを行っている．純チタンは，各種チタン金属の中でも凝着が大きく，研削砥石の目詰まりを起こす傾向が高いため，最小切込み量 1μm で平面研削を行い，仕上面粗さ 100nm(*Rz*)程度の仕上面が得られている．しかし，化学的に活性な純チタンで使用されている研削油剤はケミカルソリューション液であり，研削仕上面には，研削不良条痕部や付着物が観察される．したがって，チタン金属を超精密加工する場合は，加工による精度のみならず，化学的な仕上面形成メカニズムも考慮する必要があるといえる．

このようなチタン金属に対して，近年，単結晶ダイヤモンドバイトを用いた超精密

切削加工も検討されている[23]．一般的な超精密切削加工では，切削温度を低減させるための冷却機能や潤滑機能の向上を目的として，切削油剤を圧縮空気と共にミスト状に加工点近傍に供給する．しかし，この検討では，潤滑効果の向上を目的としてペースト状の切削油剤を加工面に塗布して，超精密切削加工が行われている．加工して得られた仕上面粗さを見てみると，α-β型チタン合金において仕上面粗さ 90nm(*Rz*)程度，純チタンにおいて仕上面粗さ 320nm(*Rz*)程度である．超精密切削仕上面は，切削条痕がほとんど観察されず，チタン合金特有の付着物が多く見られる仕上面である．したがって，チタン金属の超精密切削では，適切な切削油剤の選定および供給方法の確立が重要であると考えられる．このように，化学的に活性なチタン金属の超精密切削加工に用いる切削油剤を検討した事例はいくつか見られるが，工具寿命や切削条件が仕上面粗さに及ぼす影響を定量的に検討した事例は非常に少ない．

そのような中で，新たな超精密切削加工技術も検討されている．従来から超精密切削加工に用いられてきた単結晶ダイヤモンドバイトではなく，普通切削に用いられるコーティングバイトがチタン金属やステンレス鋼などの超精密切削加工に有効であるという結果が安井らによって示されている[24), 25)]．これらの報告では，各種チタン金属を超精密切削加工して得られる最大仕上面粗さは，切削初期において 100nm(*Rz*)以下であり，特にα-β型チタン合金の場合には，仕上面粗さ 50nm(*Rz*)程度が得られることが確認されている．さらには，工具寿命特性も検討され，コーティングバイトを用いたβ型チタン合金の超精密切削加工において，仕上面粗さ 200nm(*Rz*)程度を切削距離 2,000m 程度まで得られることが報告されている．さらに，良好な仕上面を得るために，不水溶性切削油剤を用いて，β型チタン合金に対する超精密切削仕上面粗さと切削距離の関係が検討され，150nm(*Rz*)以下の良好な仕上面が得られている．切削距離 2,000m を越えると仕上面粗さは大きくなり，切削距離 L=3,200m の時点で工具のコーティング層が摩耗し，仕上面粗さが 1,000nm(*Rz*) を越える．このことから，チタン合金の超精密切削では，不水溶性切削油剤が有効であるということが報告されている[25)]．

図 1-5　人工膝関節（左図）および人工心臓インペラー（右図）[26)]

このように，難削材に対する超精密切削加工についての研究は散見されるが，仕上面粗さ 150nm(*Rz*)以下の仕上面を，確実かつ長寿命に得られる最適超精密切削条件の検討は十分には行われていない．しかしながら，チタン金属は，次世代 DVD ピックアップレンズ用金型，ステンレス鋼は射出成形用レンズ金型などの利用が期待されている．また，物理的・化学的性質に優れるチタン金属は，他の金属には，あまり見られない生体適合性を活かして，**図 1-5** に示すような人工心臓部品などの医療部品，また，航空・宇宙産業用超精密部品として利用されている．現在の加工技術では，工具寿命が非常に短く，実用化には供さないという問題点を改善するために，切削条件やバイト材料などについて，より詳細に検討することが重要であると考えられる．

今後，より高精度にかつ低コストに超精密部品を製作するためには，超精密切削加工による加工技術の確立が望まれる．

1.3 本論文の研究目的と構成

本研究では，チタン金属に対する超精密切削加工において，光学レンズ用金型を製作する際の1つの基準となる仕上面粗さ100nm(*Rz*)以下[9]の仕上面を得ることを目標として検討を行っている．さらには，50nm(*Rz*)よりも良好な仕上面粗さを得ることができれば，チタン金属のさらなる用途の拡大につながると推測される．光学製品においては，レーザ光の乱反射を防止するために金型や導光板の仕上面は，仕上面粗さ100nm(*Rz*)以下に仕上げられている．さらに高性能な機器に使用するためには，さらに高い精度が要求されると推測される．このような製品を製作するためには，使用するバイトの寿命となるまでに要求される高平滑な仕上面を維持できる高寿命な超精密切削加工技術が重要である．

この目的を遂行するために，コーティングバイトを用いたチタン金属の超精密切削加工技術において，各種超精密切削加工条件が仕上面性状に及ぼす影響を検討した．また，これまで定量的に検討が行われていなかった単結晶ダイヤモンドバイトによるチタン金属の超精密切削加工についても検討している．検討したチタン金属は，純チタン，β型チタン合金（Ti-22V-4Al），α–β型チタン合金（Ti-6Al-4V）の3種類である．各種チタン金属は，異なる仕上面性状となるため，より高能率に高精度な仕上面を得るために必要な加工条件の選定を行った．

本論文は7章より構成され，各章の概要は以下の通りである．

第1章では，近年の超精密切削加工に関する動向を調査して確認し，チタン金属などの難削材に対する超精密切削加工の事例を挙げて，その必要性を再認識している．それらの背景に基づいて，本研究の目的と意義を明らかにしている．

第2章では，高精度な仕上面が得られる単結晶ダイヤモンドバイトをはじめ，超硬バイト，サーメットバイト，コーティングバイトをチタン金属の超精密切削加工に適用し，それぞれのバイト材料が仕上面粗さに及ぼす影響を検討する．さらに，得られた仕上面および加工メカニズムを幾何学的に解析し，コーティングバイトの有用性が確認されたことについて論ずる．

第3章では，工具切込み量が超精密切削仕上面性状に及ぼす影響を検討する．純チタンおよびβ型チタン合金では，材料中の結晶粒界段差が仕上面粗さに大きく影響して，目標とする仕上面粗さ 100nm(*Rz*)を大きく上回る仕上面となる．安井らによる従来の研究[24), 25)]では，工具切込み量 5μm を 1 つの加工条件として固定化している．このパラメータを変化させることで，結晶粒界段差を減少させることができることを実験的検討により確認した．さらには，仕上面性状の向上を確認するために，加工中に生じる切削抵抗の測定，切りくず形状の観察などを行った結果についても論じている．

第4章では，コーティングバイトによるチタン金属の超精密切削加工特性をさらに

向上させるために切削速度の効果を検討する．一般に良いとされる高速切削ではなく，1m/min 以下の極低切削速度でチタン金属を超精密切削加工し，切削過程を検討した際の仕上面性状，仕上面粗さ，工具摩耗，切りくず性状などの各種パラメータについて考察している．また，極低切削速度において，工具切込み量が仕上面粗さおよび工具摩耗に及ぼす影響について検討し，有用な結果を得ている．今後の課題となるであろう高精度化と高能率化を視野に入れながら検討した結果について論ずる．

第 5 章では，単結晶ダイヤモンドバイトが，チタン金属の超精密切削仕上面及ぼす影響について，各種加工条件を考慮して検討した．従来のダイヤモンドバイトを用いた難削材に対する超精密切削加工技術では，軟質材料の場合と同一の加工条件で超精密切削すると，300nm(*Rz*)程度の仕上面粗さが，切削距離 100m 以下の切削初期領域においてのみ得られる．それ以上の切削距離では，チタン金属の凝着性が強いために超精密切削加工が不可能になることから，さらなる検討が行われずに定量的な検討がなされていない．そこで，工具切込み量を小さく設定してチタン金属の超精密切削加工を行い，工具送り量，切削距離ごとの仕上面性状，仕上面粗さ，工具摩耗を定量的に検討した結果について報告する．

第 6 章では，前章までに検討してきたコーティングバイトを用いて，チタン金属の非球面超精密切削加工を検討している．本検討は，化学的特性，塩水耐食性に優れるチタン金属の光学レンズ用金型としての用途を想定して行った検討である．本研究で使用する超精密旋盤では，X 軸および Z 軸の 2 軸制御による非球面超精密切削加工を行うことができる．非常に高価なダイヤモンドバイトではなく，普通切削用のコーティングバイトを適用することで，仕上面粗さ 100nm(*Rz*)以下の鏡面加工ができ，比較的形状精度が良い非球面金型を製作することが可能であることを確認した．コーティングバイトによる非球面超精密切削加工技術について検討し，報告している．

最後に，第 7 章では，第 2 章から第 6 章までに得られた主要な結論を要約して，各章の内容について総括している．

【参考文献】

1) 森脇俊道，社本英二：平面・曲面における加工技術と装置・機器および制御，次世代の超精密加工技術(下巻)，株式会社　産業技術サービスセンター，(1994)，pp. 233
2) 庄司克雄：超精密加工と非球面加工，株式会社　エヌ・ティー・エス，(2004)，pp.330
3) 辻内敏雄：超精密加工機の最近動向，豊田工機技報，(1989)，Vol. 30，No. 2，pp. 1
4) 浜松工業技術センター　機械技術スタッフ：日本における超精密加工の適用と対応ー超精密加工が産み出したものー，技術講習会　超精密加工セミナー資料，(2006)，pp. 2-3
5) アライドマテリアル：ナノマイクロフォームングツール超精密切削工具 UPC，㈱アライドマテリアル工具資料，(2007)
6) 小林昭，河西敏雄，森脇俊道，ほか：超精密生産技術大系実用技術，フジテクノシステムズ，(1994)，No. 2，pp. 720
7) 安井平司，遠藤貴徳，近藤純久，黒田龍一：超精密切削加工における仕上面粗さの実験的検討 ― 無酸素銅の場合 ―，日本機械学会講演論文集，(1996)，No. 968-2，pp. 193
8) 株式会社　不二越：超精密小型非球面加工機 ASP01 資料，(2005)
9) 越後敬介：次世代 DVD 用非球面加工機「ナノアスファ ASP-E」，NACHI-Business machining news，株式会社　不二越，(2005)，Vol. 7，B2，pp. 2
10) 森健治：超精密高速送り非球面金型加工機「ナノアスファ ASP01A」，NACHI-Business machining news，株式会社　不二越，(2007)，Vol. 12，B3，pp. 2
11) 阿閉克彦：液晶導光板金型用プリズム溝加工機「ナノグルーバ AMG62P」，NACHI-Business machining news，株式会社　不二越，(2007)，Vol. 13，B1，pp. 1
12) 安井平司：超平滑機械加工技術，平成 15 年度　熊本大学「先端ものづくりセミナー」(講義編) 資料，(2003)，pp. 1-1 – 1-8
13) 安井平司：ナノメーター機械加工技術の創成と教育，(2002)
14) Shamoto Eiji, Moriwaki Toshimichi : Ultra-precision diamond cutting of hardened steel by applying elliptical vibration cutting, Ann. CIRP, (1999), Vol. 48, No. 1, pp. 441
15) Ekkard Brinksmeier, Ralf Gläbe : Basis studies on the wear behaviour of modified and coated diamond tools for precision machining of ferrous materials, Initiatives of precision engineering at the beginning of a millennium, 10th ICPE, (2001), pp.174
16) 古沢利明，日野裕，中村示，辻新次：チタンアルミナイド金属間化合物の高精度切削加工，日本機械学会論文集 (C 編)，(1998)，Vol. 64，No. 8，pp. 3191
17) Shamoto Eiji, Moriwaki Toshimichi : Study on elliptical vibration cutting, Ann. CIRP, (1994), Vol. 43, No. 1, pp. 35

18) 鈴木教和，樋野励，益田真輔，社本英二：超硬合金の超精密楕円振動切削加工 — 延性モード切削機構の検討 —，精密工学会誌，(2005)，Vol. 72, No. 4，pp. 539
19) 呉東権，森田昇，吉田嘉太郎：単結晶シリコンの切削加工に関する研究（第1報）脆性—延性遷移に伴う加工表面の変化，日本機械学会論文集（C編），(1993)，Vol. 59，No. 1，pp. 284
20) 関谷克彦，山根八洲男，鳴瀧則彦：Ti-6Al-4V 合金の高速エンドミル加工，精密工学会誌，(2004)，Vol. 71，No. 3，pp. 438
21) 熊谷信男：チタン合金の研削加工技術，精密工学会誌，(1997)，Vol. 41，No. 7，pp. 248
22) 田中善衛，小関隆博，金田亮，菅野幹男：チタン合金の鏡面研削加工，砥粒加工学会誌，(2002)，Vol. 69，No. 6，pp. 301
23) 小松原聡：難削材料の超精密加工技術の開発，島根県立東部工業技術センター　生産技術グループ研究紹介資料，(2005)
24) 安井平司，坂本重彦，川田昌樹：チタン合金のコーティング工具による超精密切削加工，精密工学会誌，(2002)，Vol. 68，No. 7，pp. 928.
25) 坂本重彦，安井平司，川田昌樹：チタン合金の超精密切削仕上面粗さに及ぼす切削油剤供給効果，精密工学会誌，(2003)，Vol. 69，No. 3，pp. 402
26) 株式会社ナカシマメディカル：チタン製医療器具製品資料，(2006)

第２章　バイト材種が超精密切削仕上面粗さに及ぼす影響

2.1　緒　言

超精密切削加工は,「単結晶ダイヤモンドバイト」を用いてアルミニウムや無酸素銅などの軟質材料を加工すると，数十ナノメートルオーダーの高平滑仕上面の形成が可能な技術として発展してきた．しかしながら，チタン金属やステンレス鋼などの難削材に対して，同様の切削条件で超精密切削加工を行うと，非常に短い切削距離で非常に大きな工具摩耗が生じ，ナノメートルオーダーの平滑面形成が不可能になることが知られている [1]．材料的に活性なチタン金属においては，特に工具に対する凝着が大きいことが,工具摩耗を促進させる要因として挙げられる.工具摩耗が大きくなれば,より大きな仕上面を得ることができず,工具寿命が短いということになる.このため,工具摩耗を減少させる方策の検討が重要な課題となる.

難削材の超精密切削加工における単結晶ダイヤモンドバイト摩耗を減少させる試みとして，いくつかの検討が報告されている [2)-4)]．ダイヤモンドバイトによる超硬合金の超精密切削加工に関する検討では，切削距離 1,000m 付近で工具逃げ面摩耗幅 20μm 程度が生じる．切削距離 1,000m で大きく摩耗するということは，工具送り量 2μm で加工した場合，直径 50mm 丸棒の端面加工のみで工具寿命となることを意味する．このようなことから，難削材の超精密切削加工おいて，ダイヤモンドバイト以外の工具材種の検討が大きな課題であると考えられる．一方では，超硬バイトやコーティングバイトなどのスロアウェイ式チップも超精密切削加工で使用されており，低コスト化や高精度化を実現できれば，産業界での実用性も高まると考えられる.

そこで本章では，ダイヤモンドバイトに変わるバイト材料を選定するために，単結晶ダイヤモンドバイト，超硬バイト，サーメットバイト，超硬母材に TiCNO 系コーティングを施したコーティングバイトの 4 種類について，超精密切削仕上面粗さに及ぼす影響を検討した．本検討では，目標とする仕上面粗さを 100nm(*Rz*)とした．実験は，まず，単結晶ダイヤモンドバイトを用いてチタン合金の超精密切削加工を行い，ダイヤモンドバイトの有効性およびその加工精度を先に確認した．次に，超硬バイト，サーメットバイト，コーティングバイトを用いて超精密切削加工し，各種工具材種が仕上面粗さに及ぼす影響を検討している．最終的には，超精密切削加工における加工メカニズムを明確にしている.

2.2　実験方法および加工条件

本章では，前述した各種工具材料が，チタン金属の超精密切削仕上面に及ぼす影響を検討している．チタン金属の超精密切削加工実験は，工作機械に超精密旋盤（東芝機械　ULC-100A）を使用して超精密正面旋削加工で行った．

超精密旋盤に取り付けた工作物および切削工具，切削油剤供給装置などの実験外観を図 2-1 および図 2-2 に示す．本実験で用いたチタン金属工作物は，直径ϕ50mm，厚さ t=20mm のβ型チタン合金（Ti-22V-4Al）であり，工作物の円端面部分を切削する正面旋削で検討を行った．工作物は，熱軟化性の樹脂を用いて磁気ディスク基板に固定し，真空チャックにより主軸に取り付けて実験を行った．検討を行った工具材種は，単結晶ダイヤモンドバイト，WC-TiC-Co 系の超硬バイト，TiC-Ni 系のサーメットバイトおよび超硬母材の工具に TiCNO 系コーティングを施したコーティングバイトの 4 種類である．切削油剤には，有機金属系添加剤や塩基性特殊添加剤等を含む油脂分をベースとする不水溶性切削油剤を使用した．切削点から約 10mm 離れた位置より，切削点近傍に圧縮空気と共にミスト供給した．切削油剤の噴出圧力は 0.7Mpa と比較的強く，供給量は毎時 40ml 程度と少なく設定している．

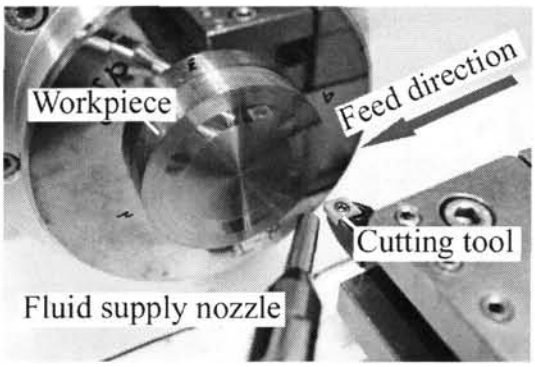


図 2-1　超精密切削加工の外観

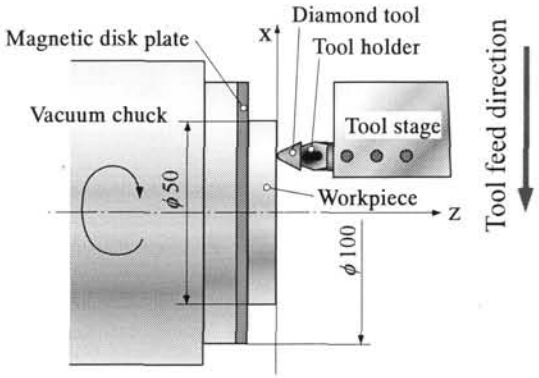


図 2-2　超精密正面旋削の概観

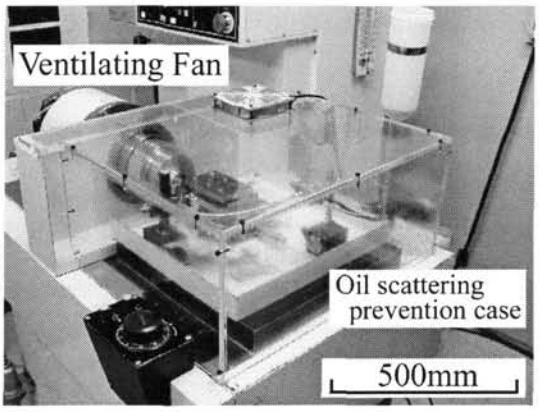


図 2-3　油剤飛散防止用ファン付ケース装着時の超精密切削加工外観

本研究では，切削油剤供給装置に圧縮空気を利用してスプレー噴射するセミドライ式給油冷却機を使用した．切削油剤をミスト供給することで，切削油剤の廃液をなくし，より効率よく切削点へ供給することができる．通常の切削加工においては，加工点を冷却し，工具と工作物の潤滑効果を期待して湿式加工が行われる．しかし，高速回転する工作物による切削油剤の飛散や使

用済み油剤の処理が困難であるという問題が生じ，環境に悪影響を及ぼすと考えられる．したがって，極少量の切削油剤と圧縮空気により切削点に油剤を供給するミスト供給の重要性が考えられる．ミスト供給においても，霧状の切削油剤が空気中に飛散し，作業者に対して悪影響を及ぼす．本研究では，**図 2-3** に示すように超精密旋盤において加工を行う部分を包囲し，また，飛散するミスト状の油剤をフィルターで除去して空気のみを排気するファンを兼備えた切削油剤飛散防止用ファン付ケースを製作し，環境に対する配慮を試みた．

表 2-1 に，各種工具材種によるβ型チタン合金の超精密切削加工実験条件を示す．切削速度は V=47-60m/min，工具送り量 f=2μm/rev，工具切込量 d=5μm という切削条件である．比較的短い切削距離での工具摩耗および仕上面の変化を観察するために，切削距離を L=212m と短くしている．

超精密切削仕上面およびダイヤモンドバイト刃先摩耗はノマルスキー式微分干渉顕微鏡，他の工具先端部摩耗は走査型電子顕微鏡（SEM）を使用して観察した．工作物仕上面粗さは，光干渉式非接触表面形状測定装置（WYKO）により測定した．

超精密切削仕上面における仕上面粗さの表記は，以後，全ての検討で JIS B 0601 (2001)に基づき Rz としている．個別の表記は，3 次元仕上面粗さ $Hr_{(3D)}(Rz)$，工具送り方向仕上面粗さ $Hr(Rz)$，切削方向仕上面粗さ $Hr_{(cut)}(Rz)$，算術平均粗さ Hra とした．単位は nm（ナノメートル）である．

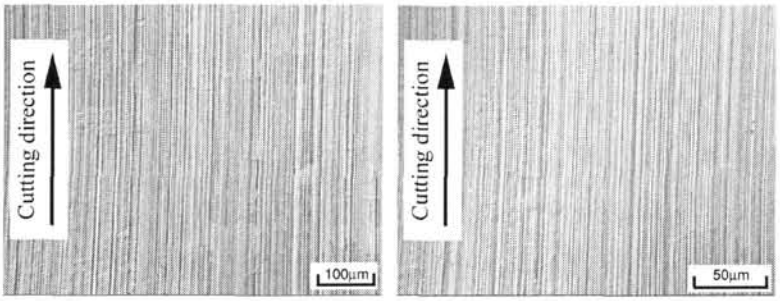
表 2-1　超精密切削加工実験条件

Machine tool:	Ultra-precision Lathe ULC-100A, Toshiba Machine CO., LTD.
Cutting tool:	Single crystal diamond tool Cermet tool Cemented-carbide tool Coated-cemented-carbide tool
Workpiece material:	Pure titanium (JIS class Ⅱ) β titanium alloy (Ti-22V-4Al) α–β titanium alloy (Ti-6Al-4V)
Cutting fluid:	Water-immiscible type cutting fluid (Type Y)
Cutting conditions	Cutting speed : V = 47 - 60 m/min Depth of cut : d = 5 μm Feed rate : f = 2μm/rev Cutting length : L = 212 m

2.3　実験結果および考察

2.3.1　各種バイトによるチタン合金の超精密切削加工

図 2-4 に，単結晶ダイヤモンドバイトを用いて，β型チタン合金を超精密切削加工して得られた仕上面の微分干渉顕微鏡写真を示す．図 2-4(a)に示す低倍率で観察した仕上面を見ると，仕上面は比較的平滑に仕上げられているように見えるが，一部に深い切削条痕が確認できる．また，仕上面にはβ型チタン合金特有の粒径 100μm 程度の結晶粒が確認できる．図 2-4(b)に示すように高倍率で観察すると，工具送り量よりも広い間隔で切削条痕が刻まれて，仕上面を形成していることが確認できる．



(a) 低倍率（x200）　　(b) 高倍率（x500）

図 2-4　単結晶ダイヤモンドバイトによるβ型チタン合金の超精密切削仕上面

[V=60m/min, f=2μm/rev, d=5μm, L=212m]

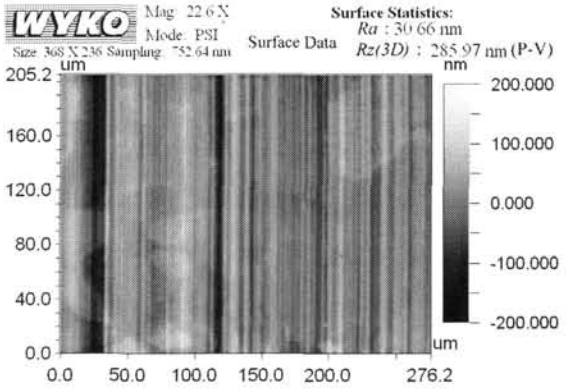


図 2-5　単結晶ダイヤモンドバイトによるβ型チタン合金超精密切削仕上面粗さ

[V=60m/min, f=2μm/rev, d=5μm, L=212m]

図 2-5 に図 2-4 で示す超精密切削仕上面を WYKO で測定した結果を示す．図 2-5 に示すように 276μm×205μm で測定した領域には，微分干渉顕微鏡写真で観察された結晶粒が確認できる．その結果，3 次元仕上面粗さ $Hr_{(3D)}$=286nm(Rz)程度，算術平均粗さ Hra=31nm 程度である．図 2-6 に，WYKO 3 次元測定結果を，通常，仕上面粗さとして評価される工具送り方向仕上面粗さおよび切削方向仕上面粗さとして評価したものを示す．はじめに，工具送り方向仕上面粗さをみると，図 2-6 上図に示すように，非常に大きな振幅の仕上面であることがわかる．このことは仕上面において，非常に深い切削条痕が刻まれていることを意味しており，図 2-4 で示した微分干渉顕微鏡写真の結果と一致する．このような深い条痕を含む仕上面粗さは Hr=197nm(Rz)程度，算術平均粗さ Hra=29nm 程度の比較的粗い仕上面であることがわかる．この仕上面粗さは目標としている仕上

面粗さ Hr=100nm(Rz)を大きく上回る．切削方向仕上面粗さをみてみる．通常，切削方向仕上面粗さは，1 本の切削条痕上を測定するため限りなく小さくなり，0（ゼロ）に近い粗さになる．しかし，図 2-6 下図に示す粗さ曲線をみると，測定領域 130μm から 200μm の領域において，大きく盛り上がった箇所が確認できる．これは，図 2-4 および図 2-5 で観察された結晶粒であると考えられる．また，10μm 付近においては，非常に大きく突出した箇所が確認できる．これは，切削過程において生じた工作物の盛上りが影響していると考えられる．その結果，切削方向仕上面粗さ $Hr_{(cut)}$=101nm(Rz)程度，算術平均粗さ Hra=12nm 程度となった．これらの結果を見ると，工具送り方向仕上面粗さには，深い条痕による影響と図 2-6 下図で確認された結晶粒界段差が影響しているものと考えられる．

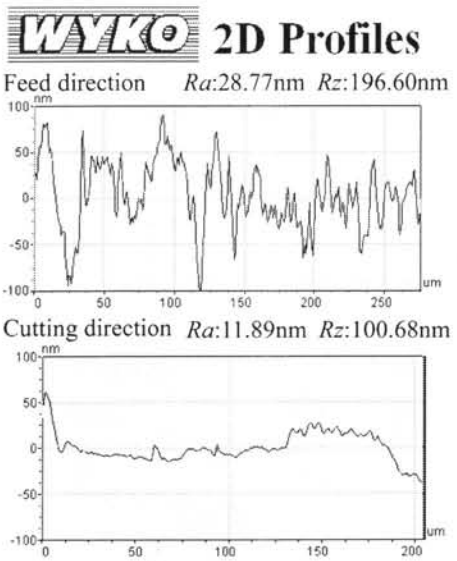


図 2-6　単結晶ダイヤモンドバイトによるβ型チタン合金超精密切削 2 次元仕上面粗さ
[V=60m/min，f=2μm/rev，d=5μm，L=212m]

図 2-7 に，超精密切削加工前と加工後の単結晶ダイヤモンドバイト刃先を微分干渉顕微鏡で観察した結果を示す．図 2-7(a)に示される加工前の工具は，刃先稜線が明瞭に確認され，非常に鋭利な刃先であることがわかる．加工後の工具は，図 2-7(b)左図に示されるように，非常に短い切削距離 L=212m にも関わら

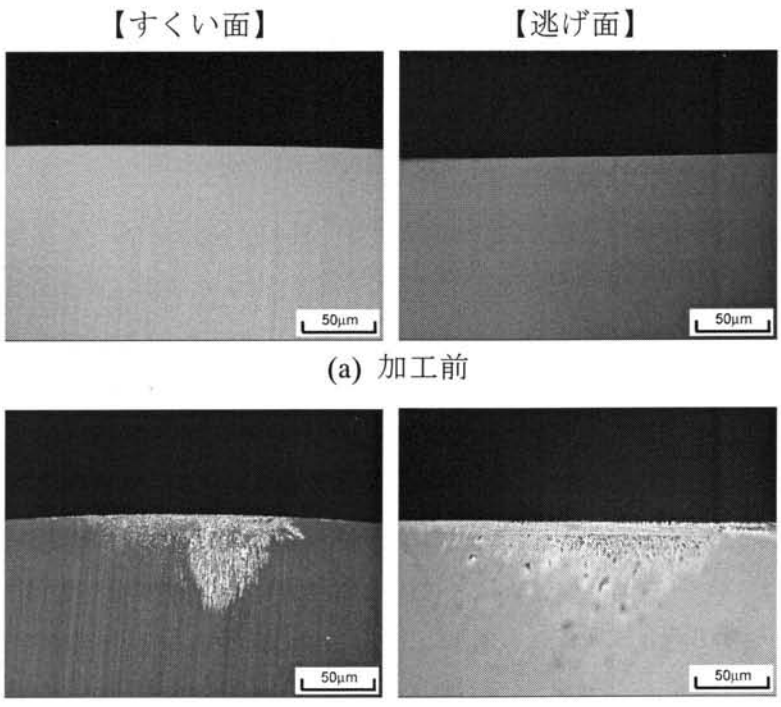


図 2-7　β型チタン合金超精密切削後の単結晶ダイヤモンドバイト刃先摩耗
[V=60m/min，f=2μm/rev，d=5μm，L=212m]

ず，工具すくい面に単結晶ダイヤモンドバイト刃先摩耗とβ型チタン合金の凝着が，理論接触幅 140μm よりも広い領域に渡って生じているのが観察される．一般にダイヤモンドはチタン金属との親和性が低いと言われているが，切削温度上昇などの原因によって，ダイヤモンドに一度工具摩耗が起こると，チタン合金がさらに摩耗部へ凝着し，切削中に凝着と脱落が繰り返されてダイヤモンドバイトの摩耗量を増加させていると推測される．図 2-7(b)右図に示す工具逃げ面摩耗をみると，刃先稜付近から逃げ面の広い領域に渡って摩耗が生じているのが確認できる．刃先稜から逃げ面摩耗最下部までを測定してみると 40μm 程度の逃げ面摩耗幅である．したがって，切削距離が短い領域において，仕上面粗さが *Hr*=100nm(*Rz*)を大きく超えていることは，急激に生じた工具摩耗によって工具刃先稜が粗くなり，それが仕上面に転写されることで起こった結果であると考えられる．

単結晶ダイヤモンドバイトは，切削距離 *L*=200m 程度で非常に大きな工具摩耗を起こし，仕上面粗さ *Hr*= 100nm(*Rz*)を越えている．また，さらに切削距離を長くして超精密切削加工を継続すると，工具摩耗が増加し，仕上面粗さは *Hr*=1,000nm(*Rz*)を越えるほど悪くなる結果が得られた [1]．したがって，本研究の目的を考えると，仕上面粗さおよび工具寿命の観点から，ダイヤモンドバイトは，難削材であるチタン合金の超精密切削加工に適さないと判断される．

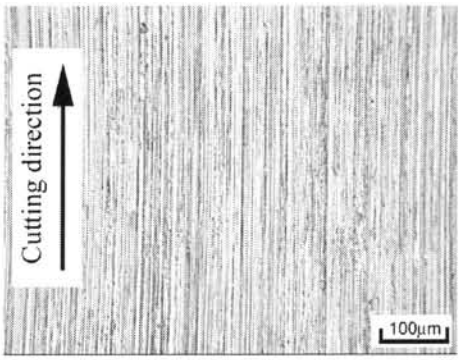


図 2-8　超硬バイトによるβ型チタン合金の超精密切削仕上面
[*V*=60m/min ，　*f*=2μm/rev ，*d*=5μm，*L*=212m]

図 2-8 に，超硬バイトでβ型チタン合金を超精密切削加工して得られた仕上面の微分干渉顕微鏡写真を示す．図 2-8 に示される仕上面では，切削条痕がむしれたような状態であり，β型チタン合金の結晶粒を確認することもできない．さらに，仕上面には，活性なチタン金属を空気中で加工した際に発生する酸化物や窒化物と思われる黒い付着物 [5]が確認できる．

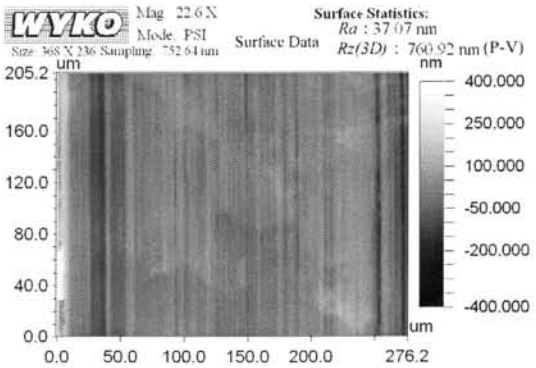


図 2-9　超硬バイトによるβ型チタン合金超精密切削仕上面粗さ
[*V*=60m/min ，　*f*=2μm/rev ，*d*=5μm，*L*=212m]

仕上面粗さを WYKO により測定した結果を**図 2-9** に示す．WYKO 測定像にお

いては，かすかに結晶粒を確認することができるが，非常に幅の広い条痕と深い条痕が混在しているのがわかる．その結果，3 次元仕上面粗さ $Hr_{(3D)}$=761nm(*Rz*)程度，算術平均粗さ *Hra*=37nm 程度となり，サブミクロンオーダーの仕上面粗さであることがわかる．**図 2-10** に，工具送り方向と切削方向について解析した結果を示す．工具送り方向仕上面粗さをみると，非常に狭い間隔の条痕で形成されていることがわかる．また，測定位置 20μm 付近に非常に大きく盛り上がった箇所がみられる．その結果，2 次元仕上面粗さ *Hr*=448nm(*Rz*)程度，算術平均粗さ *Hra*=39nm 程度の仕上面粗さである．一方，切削方向仕上面粗さは，測定領域 30 μm 付近で大きく仕上面が変わり，非常に大きな凹凸が形成されていることがわかる．切削方向仕上面粗さ $Hr_{(cut)}$=234nm(*Rz*)程度，算術平均粗さ *Hra*=33nm 程度であり，非常に大きな粗さ変化がみられる仕上面であることがわかる．通常，チタン合金の超精密切削仕上面における切削方向仕上面粗さでは結晶粒界段差が確認されるが，それ以上に凹凸の影響が大きく，同測定の表示レンジでは，結晶粒の影響を断定することができないことが考えられる．

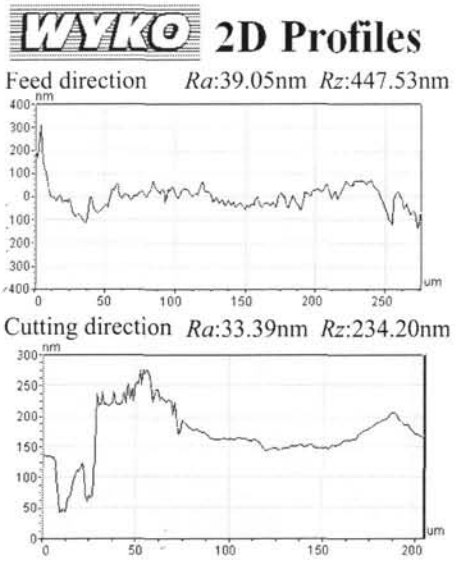
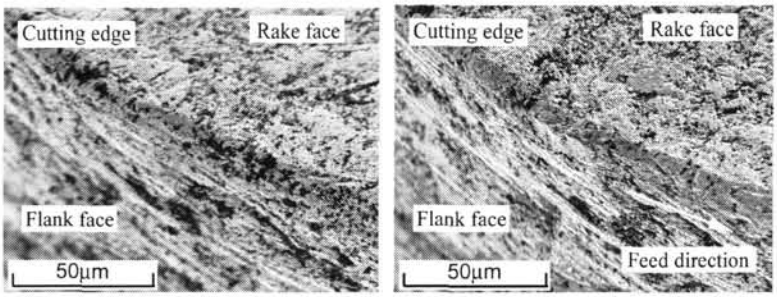


図 2-10　超硬バイトによるβ型チタン合金超精密切削 2 次元仕上面粗さ
[*V*=60m/min，*f*=2μm/rev，*d*=5μm，*L*=212m]



(a) 加工前　　(b) 加工後

図 2-11　β型チタン合金超精密切削後の超硬バイト刃先逃げ面摩耗
[*V*=60m/min，*f*=2μm/rev，*d*=5μm，*L*=212m]

図 2-11 に，β型チタン合金の超精密切削加工前および加工後の超硬バイト刃先逃げ面摩耗を SEM で観察した結果を示す．図 2-11(a)に示す加工前の工具は，すくい面および逃げ面部分が非常に粗い形状の工具であることがわかる．工具刃先には半径 2.5μm 程度の丸みがあり，工具切込み量 *d*=5μm から考えると，比較的丸い刃先で仕上

面を形成していると考えられる．超精密切削加工後の工具は，図 2-11(b)に示すように，刃先稜部分が大きく削り取られており，非常に大きな逃げ面摩耗が生じていることが確認できる．また，すくい面では，一部にチタン合金の凝着が確認できる．超硬バイトを用いたチタン合金の超精密切削加工では，切削距離 L=212m と短い領域で，刃先稜が削り取られ，非常に粗い工具形状になることで，その刃先稜が仕上面に転写されて，Hr=450nm (Rz)程度の仕上面が形成されていると考えられる．

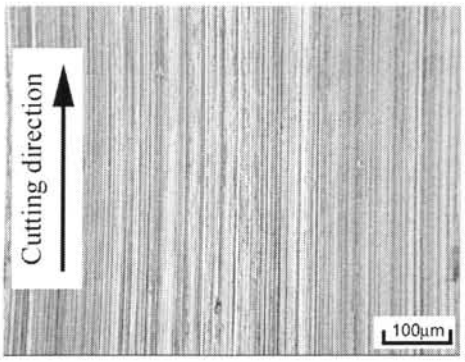


図 2-12　サーメットバイトによるβ型チタン合金超精密切削仕上面
[V=60m/min ，　f=2μm/rev ，d=5μm，L=212m]

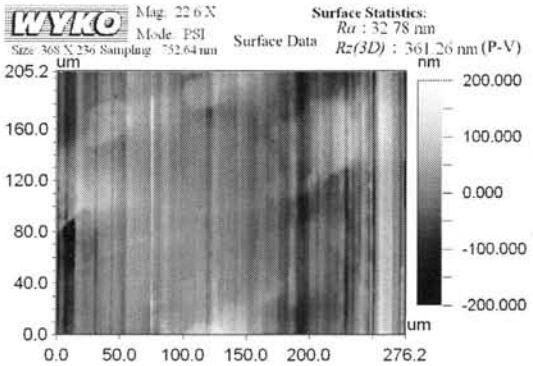


図 2-13　サーメットバイトによるβ型チタン合金超精密切削仕上面粗さ
[V=60m/min ，　f=2μm/rev ，d=5μm，L=212m]

図 2-12 に，サーメットバイトを用いて，β型チタン合金を超精密切削加工して得られた仕上面の微分干渉顕微鏡写真を示す．図 2-12 に示される仕上面では，中央付近に深い条痕の領域が観察される．それ以外の箇所では，結晶粒界が，かすかに観察される．仕上面粗さを WYKO で測定した結果を**図 2-13** に示す．図 2-13 に示す WYKO 測定像において，顕微鏡の観察結果同様，右側部分に白く表示された深い条痕が確認できる．測定結果より 3 次元仕上面粗さ $Hr_{(3D)}$=361nm(Rz)程度，算術平均粗さ Hra=33nm 程度である．**図 2-14** に図 2-13 に示す仕上面を工具送り方向および切削方向について解析した結果を示す．はじめに，工具送り方向仕上面粗さをみてみる．測定領域全体にわたって，200μm 程度の間隔で，非常に大きなうねりが確認できる．その結果，2 次元仕上面粗さ Hr=218nm(Rz)程度，算術平均粗さ Hra=34nm 程度の仕上面である．切削方向仕上面粗さ曲線では，100nm(Rz)を越える結晶粒界段差が確認できる．この粒界段差の影響を受けて仕上面粗さ $Hr_{(cut)}$=158nm(Rz)程度，算術平均粗さ Hra=32nm 程度である．超硬バイトで超精密切削して得られた結果である図 2-12 と比較すると，非常に良い仕上面であるが，目標とする Hr=100nm(Rz)よりも良好な仕上面粗さを得ることはできていない．β型チタン合金特有の結晶粒界段差が 150nm(Rz)程度であることから，それ以上の仕上

面を得ることは困難であると考えられる．

図 2-15 に，β型チタン合金の超精密切削加工前および加工後のサーメットバイト刃先逃げ面摩耗を SEM で観察した結果を示す．図 2-15(a)に示すように，加工前のサーメットバイト工具刃先は，すくい面に工具成形時に刻まれた研削条痕が確認できる．逃げ面は，非常に緻密なサーメットの結晶で構成されているため，研削による深い条痕以外はそれほど大きな影響にはならない．超精密切削加工後の工具逃げ面摩耗は，図 2-15(b)に示すように刃先稜の一部に逃げ面摩耗が観察されるのみで，それほど大きな工具摩耗ではない．一方，すくい面をみてみるとチタン合金の凝着が確認され，研削条痕の一部が隠れている．刃先稜線上の工具摩耗は小さく，非常に小さな摩耗になっている．サーメットバイトは，チタン合金との親和性が低いため，工具逃げ面摩耗が小さくなったものと考えられる．サーメット合金を構成する組織が小さいために，工具が大きく摩耗（凝着および脱落により生じるチッピングやすりへり摩耗）することなく，また摩耗しても緻密な組織の刃先が転写されることによって，仕上面が形成されていると考えられる．

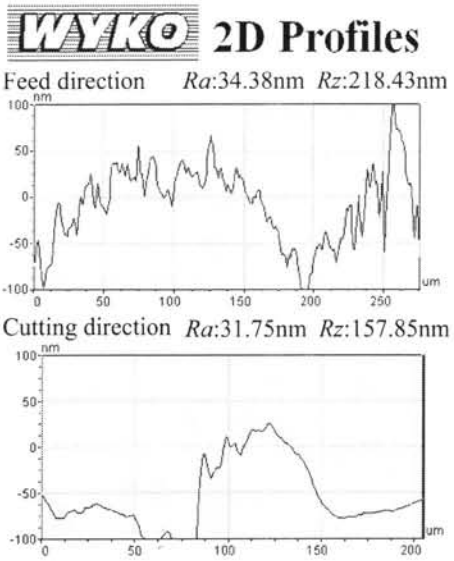
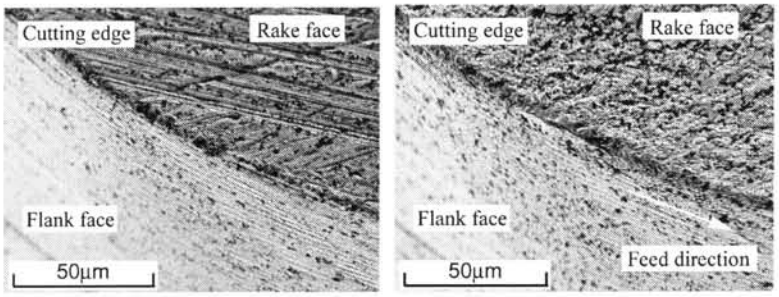


図 2-14　サーメットバイトによるβ型チタン合金超精密切削 2 次元仕上面粗さ
[V=60m/min，f=2μm/rev，d=5μm，L=212m]



(a) 加工前　　(b) 加工後

図 2-15　β型チタン合金超精密切削後のサーメットバイト刃先逃げ面摩耗
[V=60m/min，f=2μm/rev，d=5μm，L=212m]

図 2-16 に，コーティングバイトを用いて，β型チタン合金を超精密切削加工した場合の微分干渉顕微鏡写真を示す．図 2-16 に示される仕上面では，一部に深い条痕が確認される．仕上面全体では，β型チタン合金特有の粒径 100μm 程度の結晶粒が確認できる．β型チタン合金の超精密切削仕上面では，結晶粒界を確認できることが，仕上

面の状態を知る上で重要になると考えられる．結晶粒が確認できたコーティングバイトによる超精密切削仕上面粗さを WYKO により測定した結果を**図 2-17** に示す．図 2-17 に示す WYKO 測定像において，WYKO 測定画面においても結晶粒が確認できる．WYKO による測定結果より 3 次元仕上面粗さ $Hr_{(3D)}$=164nm(*Rz*)程度，算術平均粗さ *Hra*=17nm 程度であり，検討を行ってきた単結晶ダイヤモンドバイト，超硬バイト，サーメットバイトおよびコーティングバイトの 4 種類のチップ材種の中で最も良好な仕上面が得られた．**図 2-18** に図 2-17 に示す仕上面を工具送り方向および切削方向について解析した結果を示す．図 2-18 上図に示す工具送り方向仕上面粗さ曲線をみてみる．工具送り量による非常に短い周期の条痕があり，さらには約 200μm 周期の大きなうねりが確認できる．これらの影響を受けて 2 次元仕上面粗さ *Hr*=129nm(*Rz*)程度，算術平均粗さ *Hra*=23nm 程度の仕上面粗さである．目標とする仕上面粗さ *Hr*=100nm(*Rz*)には，わずかに及ばないが比較的良好な仕上面粗さである．切削方向仕上面粗さをみると，粒界段差は 100nm (*Rz*)よりも小さくなっているのがわかる．この影響を受けて仕上面粗さ $Hr_{(cut)}$=102nm (*Rz*)程度，算術平均粗さ *Hra*=21nm 程度となった．

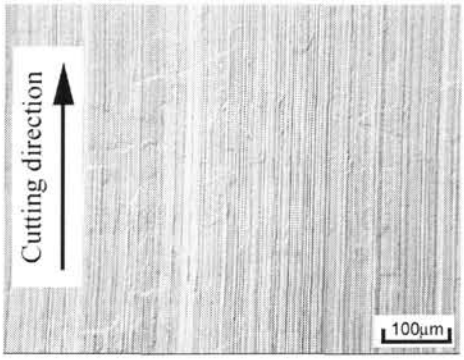


図 2-16　コーティングバイトによる β型チタン合金の超精密切削仕上面
[*V*=60m/min, *f*=2μm/rev, *d*=5μm, *L*=212m]

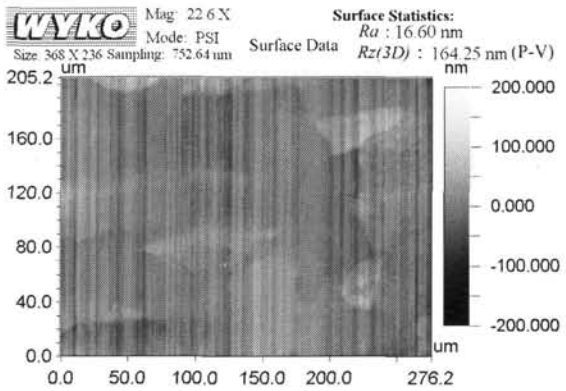


図 2-17　コーティングバイトによる β型チタン合金超精密切削仕上面粗さ
[*V*=60m/min, *f*=2μm/rev, *d*=5μm, *L*=212m]

図 2-19 に，β型チタン合金を超精密切削加工する前のコーティングバイト刃先逃げ面および加工した後のコーティングバイト刃先逃げ面摩耗を SEM で観察した結果を示す．図 2-19(a)に示すように，工具すくい面には工具母材である超硬を成形した際の研削条痕が確認でき，その条痕上に TiCNO 系コーティングが施されていることが確認できる．また，工具逃げ面にも研削条痕が確認できるが，刃先稜線方向に沿って，非常に滑らかな状態であることがわかる．この工具でβ型チタン合金を超精密切削加工

した後の工具刃先摩耗を図 2-19(b)に示す．工具すくい面には，研削条痕がかすかに隠れる程度でβ型チタン合金の凝着が確認できる．また，刃先稜線が広い範囲に渡って摩耗しており，加工前の比較的鋭利な状態の工具刃先稜は，なくなっている．しかし，2 次元仕上面粗さは，*Hr*=129nm(*Rz*)程度の良好な仕上面が得られている．このことは，チタン合金の超精密切削加工において，コーティングバイトの工具逃げ面部分は摩耗するが，比較的短い切削距離においては工具が適度になめ滑らかに摩耗し，その平滑化された工具逃げ面が仕上面を形成することによって，このように比較的平滑化された仕上面が得られると推測される．

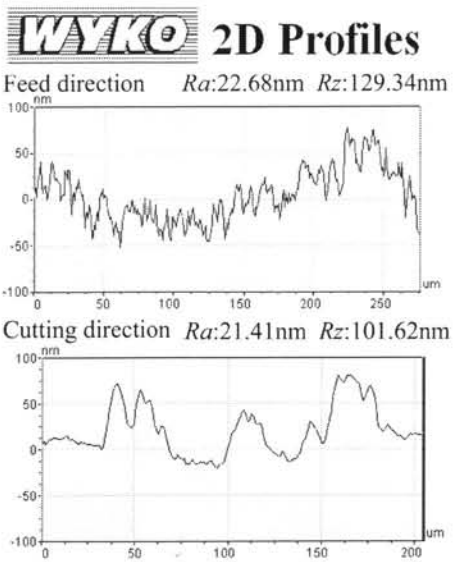
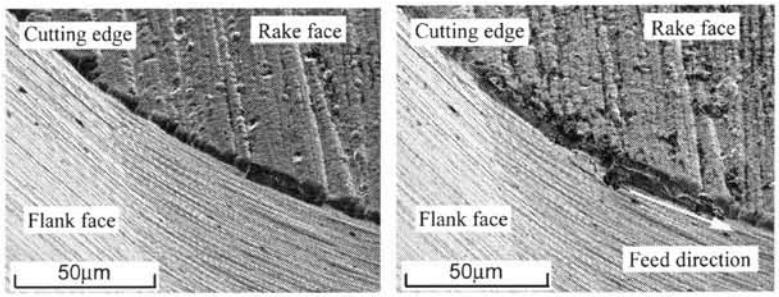


図 2-18　コーティングバイトによるβ型チタン合金超精密切削 2 次元仕上面粗さ
[*V*=60m/min，*f*=2μm/rev，*d*=5μm，*L*=212m]

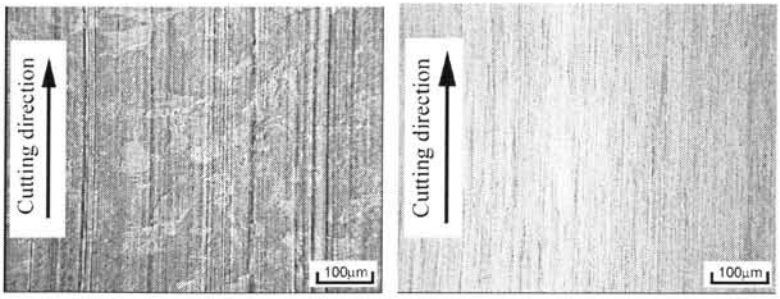


(a) 加工前　　(b) 加工後

図 2-19　β型チタン合金超精密切削後のコーティングバイト刃先逃げ面摩耗
[*V*=60m/min，*f*=2μm/rev，*d*=5μm，*L*=212m]

2.3.2　コーティングバイトによる各種チタン金属の超精密切削加工

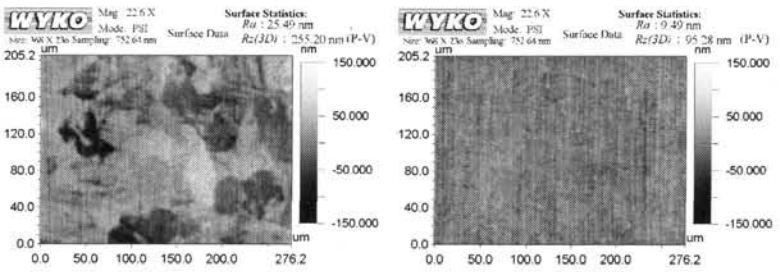
図 2-20 に，仕上面粗さ 130nm(*Rz*)程度の仕上面を得ることができたコーティングバイトを用いて，純チタンおよびα–β型チタン合金を超精密切削して得られた仕上面の微分干渉顕微鏡観察結果を示す．図 2-20(a)に示す純チタンの超精密切削仕上面においては，コーティングバイトにより刻まれた切削条痕に加え，β型チタン合金よりも大きな粒径である結晶粒界が，仕上面全面で明瞭に確認できる．図 2-20(b)に示すα–β型チタン合金の超精密切削仕上面においては，ほぼ一様な仕上面が形成されており，切削加工により現れる切削条痕以外の要素は観察されない．α–β型チタン合金の場合は，結晶粒径が 1μm 程度と非常に小さいため，低倍率では観察しづらいと考えられる．また，空気中で加工した場合，化学的に活性なチタンと空気が反応して，酸化チタンや窒化チタンを形成している [5]ためと思われる切削条痕の隠れている箇所が観察される．



(a) 純チタン（JIS Ⅱ種）　(b) α–β型チタン合金

図 2-20　コーティングバイトによる各種チタンの超精密切削仕上面

[*V*=60m/min, *f*=2μm/rev, *d*=5μm, *L*=212m]



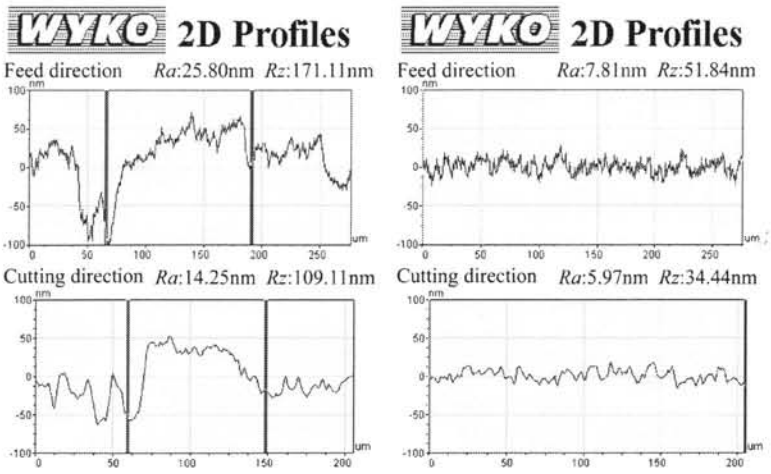
(a) 純チタン（JIS Ⅱ種）　(b) α–β型チタン合金

図 2-21　各種チタンの超精密切削仕上面 WYKO 測定結果

[*V*=60m/min, *f*=2μm/rev, *d*=5μm, *L*=212m]

図 2-20 に示す仕上面を WYKO で測定した結果を**図 2-21** に示す．図 2-21(a)に示す純チタンの超精密切削仕上面では，結晶粒の影響が大きく，3 次元仕上面粗さ $Hr_{(3D)}$=255nm(*Rz*)程度である．一方，結晶粒界が観察されない良好な仕上面が得られたα–β型チタン合金の場合，3 次元仕上面粗さ $Hr_{(3D)}$=95nm(*Rz*)程度となり，3 次元仕上面粗さにおいて目標とする 100nm(*Rz*)以下の仕上面が得られた．**図 2-22** に WYKO で測定した仕上面を工具送り方向および切削方向について解析した結果を示す．図 2-22(a)に示す純チタンの仕上面は，工具送り方向において非常に大きなうねりが確認でき，

仕上面粗さ *Hr*=171nm (*Rz*)程度にとどまっている．切削方向仕上面粗さをみると，β型チタン合金を越える大きさの結晶粒が確認でき，その粒界段差は $Hr_{(cut)}$=100nm(*Rz*) を越える．この大きな粒界段差の影響を受けて純チタンの超精密切削仕上面粗さは非常に大きくなっている．一方，α–β型チタン合金の 2 次元仕上面粗さをみてみる．図 2-22(b)に示すように，工具送り方向仕上面粗さにおいては，うねりも少なく，とても良好な仕上面が得られているのがわかる．2 次元仕上面粗さ *Hr*=52nm(*Rz*)程度であり，非常に平滑化された仕上面になっている．切削方向仕上面粗さをみても，結晶粒の影響がとても小さいことがわかる．切削方向仕上面粗さ $Hr_{(cut)}$=34nm(*Rz*)であり，他のチタン合金と比較すると，とても小さい結晶粒界段差であるために，工具送り方向の仕上面粗さも 52nm(*Rz*)と非常に良好な仕上面が得られた．また，図 2-19 に示すコーティング工具刃先性状を考えると，比較的粗い工具刃先から，仕上面粗さ *Hr*=100nm(*Rz*)程度の仕上面粗さが得られていることから，工具刃先形状が超精密切削仕上面に対して，精度よく転写されていると考えられる．



(a) 純チタン（JIS Ⅱ種）　(b) α–β型チタン合金

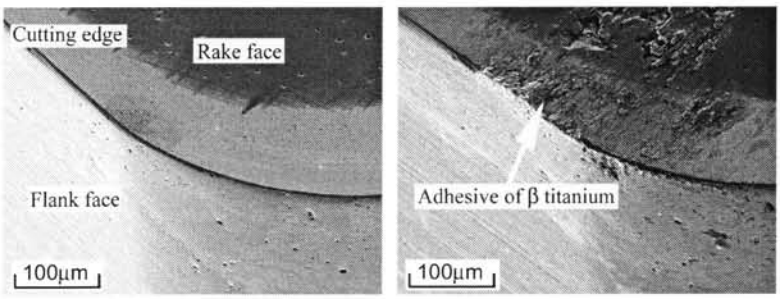
図 2-22　各種チタンの超精密切削仕上面 WYKO2 次元測定結果

[*V*=60m/min, *f*=2μm/rev, *d*=5μm, *L*=212m]

2.3.3　成形コーティングバイトによる仕上面粗さの向上

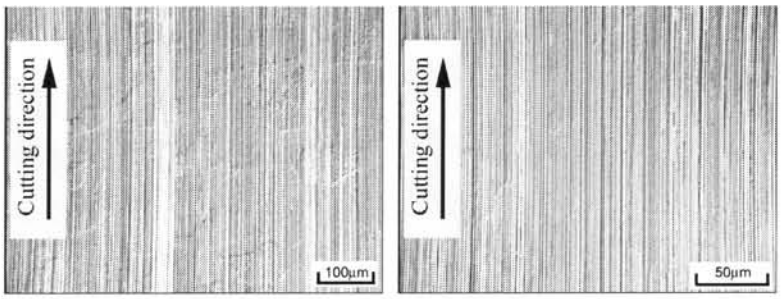
図 2-23 に成形コーティングバイトの刃先 SEM 像を示す．本検討では，超精密切削加工の加工原理において，仕上面の形成は，工具刃先の転写が非常に重要な要因になると考えられる．つまり，刃先稜線方向粗さが滑らかで，鋭利な刃先を持つ成形コーティングバイト[6), 7)]を用いることで，仕上面を向上させることができると考えた．そこで，成形コーティングバイトを製作し，その効果を実験的に検討した．

図 2-19 左図に示す市販バイトのすくい面および逃げ面は，工具成形で形成された研削条痕によって非常に粗くなっているが，図 2-23 左図の成形バイトは，すくい面および逃げ面が平滑化され，非常に鋭利な刃先稜になっていることが確認できる．超精密切削加工後のバイト刃先 SEM 像を見てみると，図 2-23(b)に示される成形コーティングバイトでは，すくい面のコーティング層が除去さ



(a) 加工前　　(b) 加工後

図 2-23　β型チタン合金超精密切削前後の成形コーティングバイト刃先逃げ面比較
[V=60m/min, f=2μm/rev, d=5μm, L=212m]



(a) 低倍率（x200）　　(b) 高倍率（x500）

図 2-24　成形コーティングバイトによるβ型チタン合金の超精密切削仕上面
[V=60m/min, f=2μm/rev, d=5μm, L=212m]

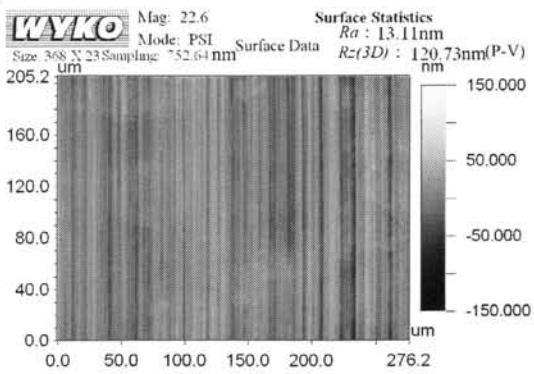


図 2-25　成形コーティングバイトによるβ型チタン合金超精密切削仕上面粗さ
[V=60m/min, f=2μm/rev, d=5μm, L=212m]

れているため，母材である超硬にβ型チタン合金が広い範囲に凝着しているのがわかる．このことから，工具表面に施されたコーティング層は，β型チタン合金が工具へ凝着することを抑制していると考えられる．

図 2-24 に成形コーティングバイトを用いて，β型チタン合金を工具切込み量 d=5μm で超精密切削した場合の微分干渉顕微鏡写真を示す．図 2-24(a)に示される仕上面においては，図 2-16 に示す市販状態のコーティングバイトを用いて加工した仕上面と同様に結晶粒界が確認できる．しかしながら，図 2-24(b)を見ると，鋭利な刃先形状で加工されたことにより，シャープな切削条痕が仕上面全面にわたって刻まれているのがわかる．

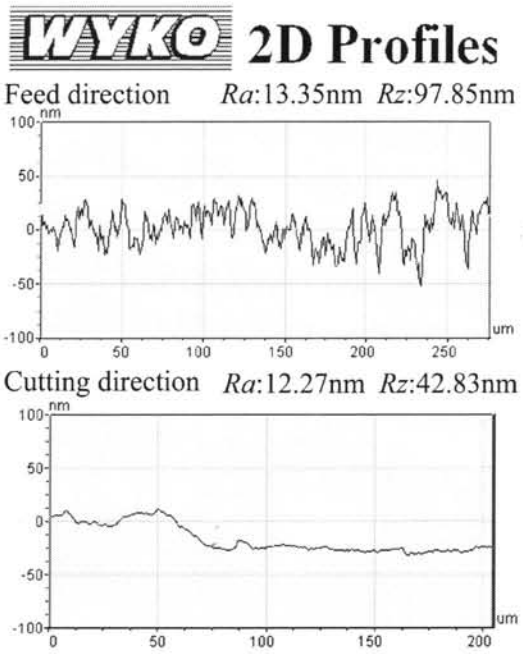


図 2-26　成形コーティングバイトによるβ型チタン合金超精密切削 2 次元仕上面粗さ

この仕上面を WYKO により測定した結果を**図 2-25** に示す．WYKO 測定結果においては，非常に規則正しい間隔で切削条痕が刻まれており，かすかにではあるが，結晶粒界が確認できる．測定結果より，3 次元仕上面粗さ $Hr_{(3D)}$=121nm(Rz)程度である．図 2-17 に示すコーティングバイトの場合と比較すると，40nm(Rz)程度の仕上面粗さの向上である．**図 2-26** に，工具送り方向および切削方向の仕上面粗さを測定した結果を示す．図 2-26 上図に示される工具送り方向仕上面粗さをみると，コーティングバイトの仕上面で見られたような大きな波長のうねり成分は，見られなくなっている．その結果，切削方向仕上面粗さ Hr=98nm(Rz)であり，40nm(Rz)程度，仕上面粗さが減少している．一方，図 2-26 下図に示される切削方向仕上面粗さをみると，コーティングバイトで加工した仕上面では $Hr_{(cut)}$=100nm(Rz)を越えていたものが，成形コーティングバイトを用いることで $Hr_{(cut)}$=43nm(Rz)程度まで減少している．これらの結果より，刃先を鋭利にした成形コーティングバイトを用いることで，仕上面で発生する大きなうねり成分を小さくすることが可能になり，さらには，100nm(Rz)を越える結晶粒界段差を減少させることができたといえる．

2.3.4　各種バイトによる超精密切削仕上面粗さの比較

本章では，チタン金属の超精密切削に用いる各種バイト材料が，超精密切削仕上面粗さに及ぼす影響を検討した．**図 2-27** に，各種バイトを用いて超精密切削して得られた仕上面粗さを示す．

単結晶ダイヤモンドバイトでβ型チタン合金を超精密切削すると，100nm(*Rz*)を越える結晶粒界段差や深い切削条痕の影響が大きく，仕上面粗さ *Hr*=200nm(*Rz*)程度の仕上面が得られる．超硬バイトおよびサーメットバイトを用いた場合，比較的粗い工具刃先形状が仕上面に転写される．そのため仕上面粗さは，*Hr*=210nm(*Rz*)を越え，非常に粗い仕上面となる．一方，コーティングバイトを用いると，比較的滑らかな工具刃先稜形状が仕上面に転写され，目標とする仕上面粗さ 100nm(*Rz*)には及ばないが，*Hr*=129nm(*Rz*)程度の平滑化された仕上面が得られる．

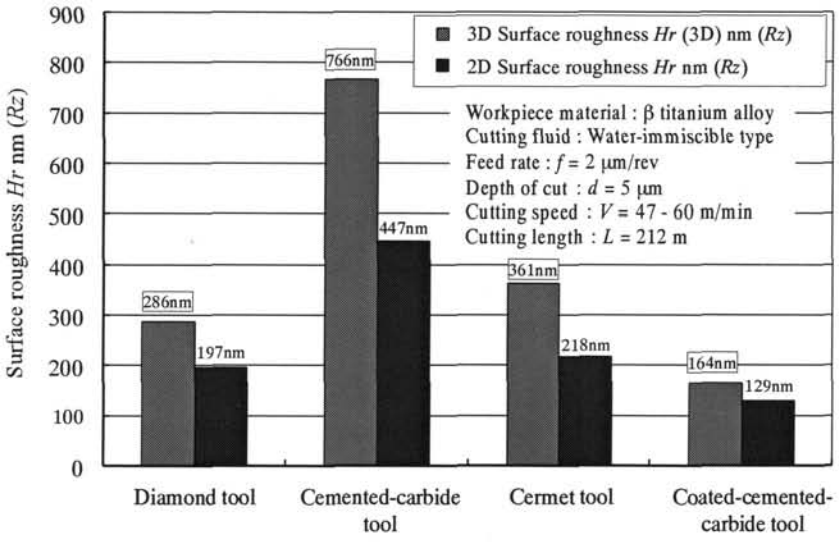


図 2-27　各種バイト材料によるβ型チタン合金超精密切削仕上面粗さ

各種バイトで加工して得られた超精密切削仕上面粗さを検討するために，本検討で用いた単結晶ダイヤモンドバイトおよび超硬バイト，サーメットバイト，コーティングバイトの 4 種のバイト刃先形状について観察・測定を行った．

図 2-28 に微分干渉顕微鏡を用いて観察した単結晶ダイヤモンドバイトの刃先形状観察写真を示す．本研究で使用した単結晶ダイヤモンドバイトは，通常，汎用切削用とされている NEW-D バイトであるが，図 2-28 から分かるように，すくい面は非常になめらかな形状をしているのがわかる．また，刃先の輪郭形状が整っており，2 軸制

御で球面や非球面を超精密切削加工する際は，理論に非常に近い加工精度が得られると考えられる．

図 2-29 に，本研究で使用した単結晶ダイヤモンドバイトの工具刃先性状を調べるために，鏡面加工された無酸素銅に転写したバイト刃先転写痕の微分干渉顕微鏡写真および非接触式表面形状測定装置（WYKO）によって刃先形状を解析した結果を示す．本検討は，ダイヤモンドバイトで超精密切削して仕上面粗さ Hr=10nm(Rz)以下に仕上げられた無酸素銅に対し，ダイヤモンドバイトを 5μm 程度押込み，周辺材料の盛上りを除去するために，さらに 0.1μm の工具切込み量で超精密切削したものである．図 2-29(a)に示すように，押し込まれた工具転写痕のすくい面部分 Y-Y'線上が非常に真直な稜線になっているのがわかる．この転写痕を WYKO で測定した結果が図 2-29(b)に示される．工具刃先形状が，無酸素銅の超精密切削仕上面に転写され，Y-Y'線上が工具先端の刃先稜部分を示し，X-X'線上に工具すくい面および逃げ面形状が転写されているのがわかる．3 次元測定結果を各線上で解析した結果が図 2-29(c)に示される．X-X'方向について見ると，逃げ面部分はわずかに粗い形状になっているのがわかる．工具刃先丸みは，r= 10nm 程度であり，非常に鋭利な刃先形状であるこ

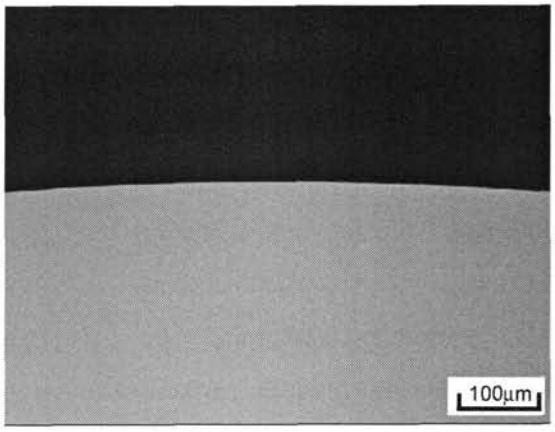
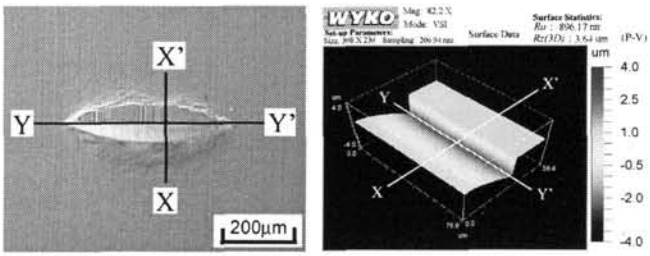
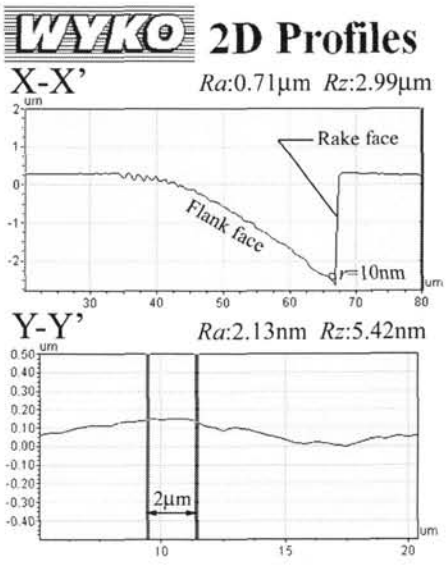


図 2-28　単結晶ダイヤモンドバイト刃先の微分干渉顕微鏡観察結果



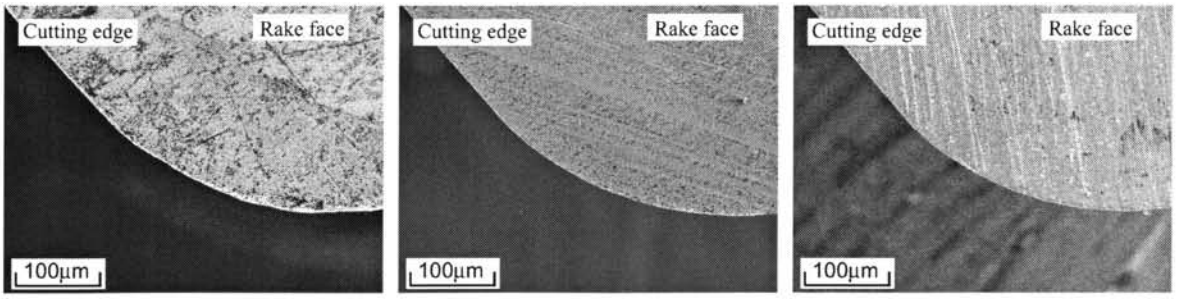
(a) 刃先転写痕　　(b) WYKO3 次元測定像



(c) WYKO2 次元解析結果

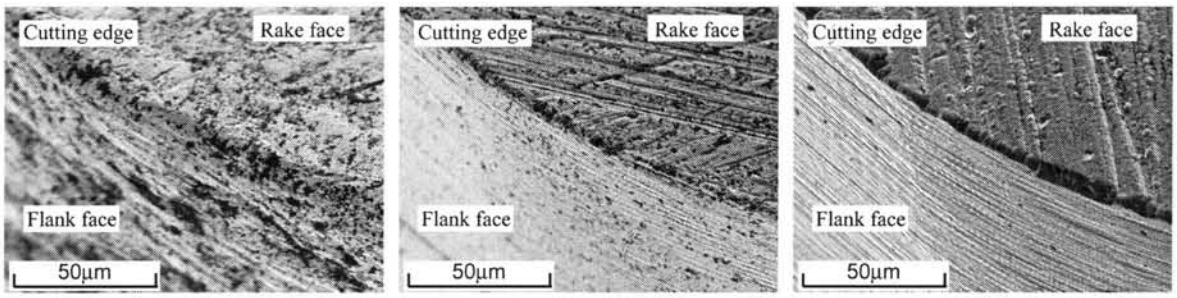
図 2-29　ダイヤモンドバイト刃先形状の検討
（使用材料：無酸素銅 OFHC）

【工具すくい面】



(a) 超硬バイト　　(b) サーメットバイト　　(c) コーティングバイト

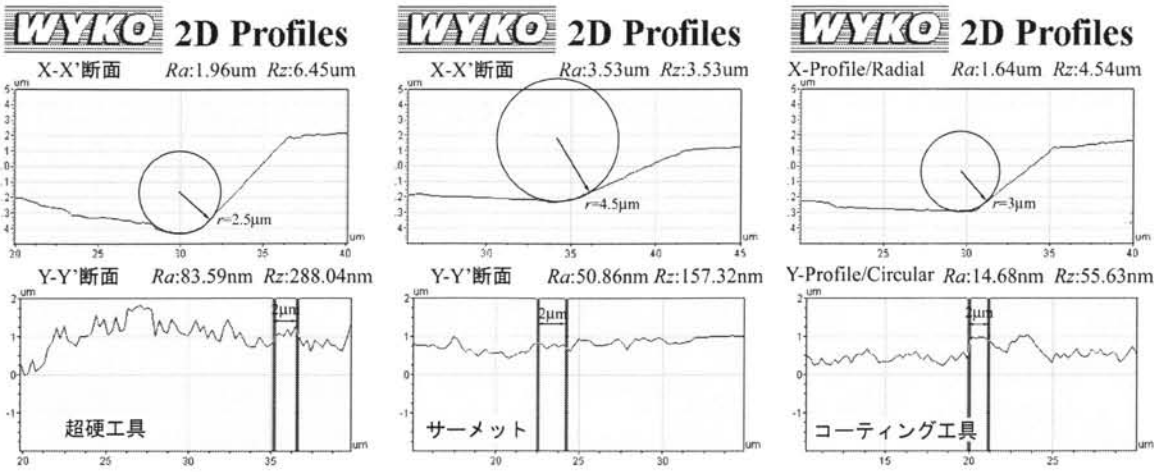
【工具逃げ面】



(a) 超硬バイト　　(b) サーメットバイト　　(c) コーティングバイト

図 2-30　各種工具刃先形状および刃先稜性状の SEM 観察写真

とが確認された．次に，刃先稜線を表す Y-Y'方向の粗さについてみてみる．本結果をみると，測定領域 20μm において，10μm 程度の周期でうねりが確認できる．また，刃先稜における 2μm 領域の粗さは，最大粗さ *Hr*=5.4nm(*Rz*)であり，非常に整った刃先形状をしている．超精密切削加工における仕上面の形成は，工具切れ刃稜が工作物に「転写」されて形成される [8]ということが知られている．この観点からすれば，最大粗さ 5nm(*Rz*)の非常になめらかなダイヤモンドバイト刃先が，工作物に転写されて仕上面を形成すると考えられる．また，刃先丸み半径 10nm 程度の非常に鋭利な工具刃先は，工具切込み量が数マイクロメートルと非常に小さい超精密切削加工においても，負のすくい角になることはなく，よりスムーズに切りくずを排出する加工が可能になり，その結果，平滑化された超精密切削仕上面を得ることが可能になると考えられる．しかしながら，実際に加工してみると，ダイヤモンドバイトの刃先付近では，被削材であるチタン合金が凝着する．この凝着が，発生脱落を繰り返すうちに，ダイヤモンドバイト刃先部分を脆化させて，比較的大きな摩耗を生じさせていると考えられる．その結果，工具刃先稜は非常に粗い形状となり，その粗い刃先形状が仕上面に転写されるために，仕上面粗さが図 2-6 に示すように *Hr*=200nm(*Rz*)程度になったと推測される．



(a) 超硬バイト　　(b) サーメットバイト　　(c) コーティングバイト

図 2-31　各種工具の工具刃先形状および刃先稜の粗さ

なお，本結果において，刃先稜粗さ測定長を 2μm としたのは，検討を行った加工条件の工具送り量を f=2μm/rev と比較的小さく設定して超精密切削加工を行っているため，工具刃先粗さ転写の観点から同条件の 2μm としている．

同様にして，超硬バイト，サーメットバイト，コーティングバイトの 3 種類の工具刃先性状の検討を行った．**図 2-30** に，各工具刃先について，SEM を用いて観察した結果を示す．図 2-30(a)上図に示すように超硬合金の粒径は比較的大きいことがわかる．下図に示す逃げ面をみると，すくい面の研削条痕と同様に比較的深い条痕が刻まれ，刃先稜は少し丸くなっている．一方，サーメットバイトの工具刃先は，図 2-30(b)に示すように，すくい面において，比較的平滑化されており，超硬バイトと比較すると整っているように観察される．逃げ面は，すくい面の研削条痕に加えて，同様の条痕が見られるが，比較的整った滑らかな形状をしている．最も良好な仕上面が得られたコーティングバイトの工具刃先は，図 2-30(c)に示される．すくい面をみると，工具成形時の深い研削条痕の上にコーティングが施され，サーメットバイトの方が滑らかなように見える．逃げ面では，条痕の上にコーティングが非常に均一に施され，刃先稜線と同じ方向に条痕がみられるだけである．刃先稜をみると比較的粗い形状をしているように観察できるが，コーティング層を構成する粒の 1 つ 1 つが非常に滑らかな形状をしている．

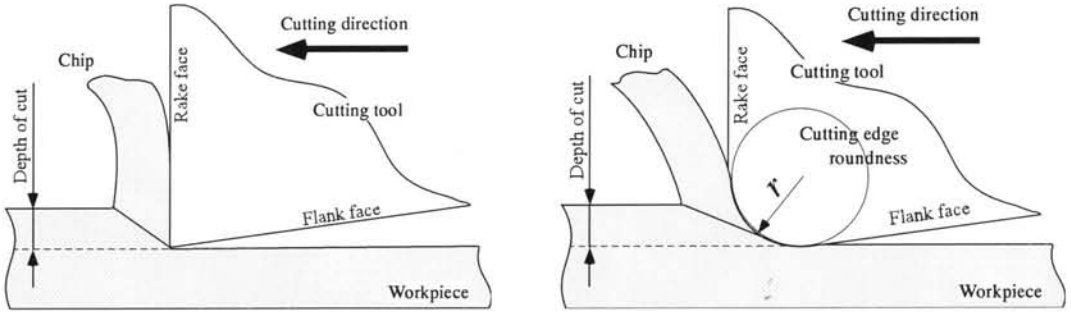
その粗さを調べるために，単結晶ダイヤモンドバイトの場合と同様に，工具刃先を転写させて WYKO を用いて測定した結果を**図 2-31** に示す．得られた結果を 2 次元的に解析した結果をみると，いずれの工具刃先においても刃先丸みがついているのがわかる．超硬バイト，サーメットバイト，コーティングバイトの各工具刃先丸みは，

r=2.5μm，4.5μm，3.0μm 程度である．これは，図 2-29 で観察された単結晶ダイヤモンドの工具刃先形状と比較すると非常に大きな刃先丸みである．一方，刃先稜方向の刃先稜粗さをみてみる．超硬バイトの刃先稜粗さは，SEM 観察結果からも確認されたように比較的大きな超硬合金の結晶粒が工具形状を形成しているために，結晶粒の方位をそろえない限り非常に粗い形状となる．その結果，刃先稜線の 2 μm 長における粗さは 288nm(*Rz*)となり，サブミクロンオーダーの刃先稜性状であるといえる．サーメットバイトの刃先稜粗さは，比較的滑らかな形状をしていたために 157nm(*Rz*)であった．一方，コーティングバイトの刃先は深い研削条痕があり，粗いように見られる．しかし，刃先稜線を形成するコーティングの各粒の表面は非常に滑らかな形状をしており，2 μm 長における粗さは 56nm(*Rz*)であった．

超精密切削仕上面形成のメカニズムを考えれば，6nm(*Rz*)以下の非常に滑らかな工具刃先稜であるダイヤモンドバイトを用いることで，最も平滑化された仕上面を形成することができると考えられる．しかしながら，加工中の工具刃先には，チタン合金の凝着が切削初期の段階で生じ，摩耗により粗くなった工具刃先が仕上面に転写されて，仕上面粗さが悪化する．一方，コーティングバイトは，加工前の工具刃先稜では 55nm(*Rz*)程度の粗さである．加工の進行にともない，工具逃げ面摩耗は増加するが，摩耗面が滑らかな状態であることから，平滑化された摩耗面が仕上面に転写され，良好な仕上面を形成していると推測できる．したがって，本検討では，コーティングバイトが，チタン金属の超精密切削加工に最も有効であるということが確認された．

2.3.5　コーティングバイトによる超精密切削仕上面生成機構の検討

前節までに，チタン金属の超精密切削加工には，コーティングバイトが最も有用であることが確認された．そこで，有用性が確認されたコーティングバイトによる超精密切削仕上面生成のメカニズムについて検討した．



(a) 普通切削加工メカニズム　　(b) 超精密切削加工メカニズム

図 2-32　普通切削加工と超精密切削加工メカニズムの比較

超精密切削加工は，非常に微細な加工現象であることから，普通切削加工と加工現象を比較すると，加工を行う工具形状の影響を大きく受ける．**図 2-32** に普通切削と超精密切削加工の各メカニズムを図解したものを示す．なお，図 2-32 では，同じスケールで示しているが，超精密切削加工では，数十μm を拡大して表している．図 2-32(a)に示す普通切削において用いられる工具の刃先丸みは，ホーニング加工されている場合を除いて，数百μm の工具切込み量よりも小さくなる．一方，図 2-32(b)に示す超精密切削加工では，加工に用いる工具刃先にホーニング加工を施していない工具でも，数μm の工具切込み量に対して，同程度か，それ以上の刃先丸みがある．これは，すくい角 0° の工具を用いたとしても，すくい面の部分で切削することができず，刃先丸みの部分で切削することになるため，実質は負のすくい角となることを意味する．

図 2-33 に，コーティングバイト刃先の SEM 観察像を示す．図 2-31(c)に示す工具刃先測定では，3μm 程度の工具刃先丸みがついている．図 2-33 に示すように，検討を行った工具では，6μm 程度の工具刃先丸みがついており，これらの結果から，ホーニング加工されていないコーティングバイトにおいては，刃先丸みの大きさは，工具によって異なることがわかる．この工具を用いて，工具切込み量 d=5μm の加工条件で超精密切削加工を行うと，完全に刃先丸みの部分で切りくず排出を行うことになる．

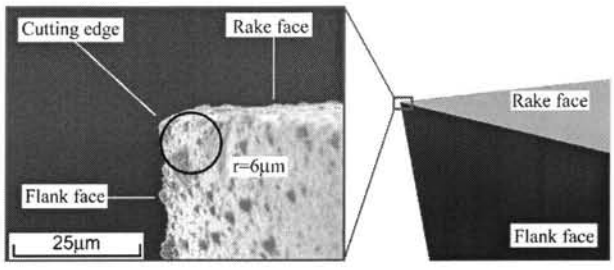


図 2-33　コーティングバイトの刃先丸み

また，図 2-33 の SEM 像からもわかるように，工具表面は，コーティングの影響を受けて非常に粗い形状であることが確認できる．

図 2-34 に，コーティングバイト表層に施されているコーティング層の構成を図解したものを示す．コーティングバイトでは，図 2-21(b)に示したようにα–β型チタン合金で 3 次元仕上面粗さ $Hr_{(3D)}$=97nm(*Rz*)程度の仕上面が得られていることから，バイト送り量 *f*=2μm/rev に対応するバイト刃先稜 2μm 程度の長さにおいては，バイト刃先稜は数 10nm 以下のマイクロチッピングしかない滑らかな状態になっていると仮定される [1]．コーティングバイトでこのような滑らかなバイト刃先稜が考えられるのは，図 2-34 に示すように，コーティング層が非晶質の非常に稠密な層で構成されているためである．ダイヤモンドバイトの初期切削過程では，工作物であるチタン金属との間に大きな凝着が生じ，その影響で仕上面粗さ *Hr*=300nm(*Rz*)程度になると考えられる．ダイヤモンドバイト刃先では，加工によるチタン金属の凝着と摩耗により，刃先稜形状が鋭利な状態ではなくなり，摩耗した刃先が転写されて仕上面粗さが大きくなると考えられる．

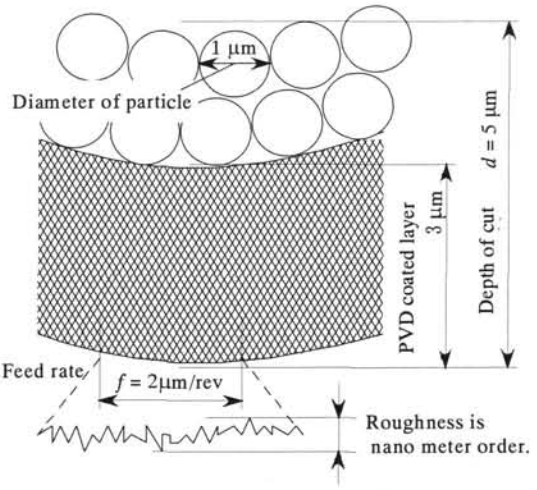
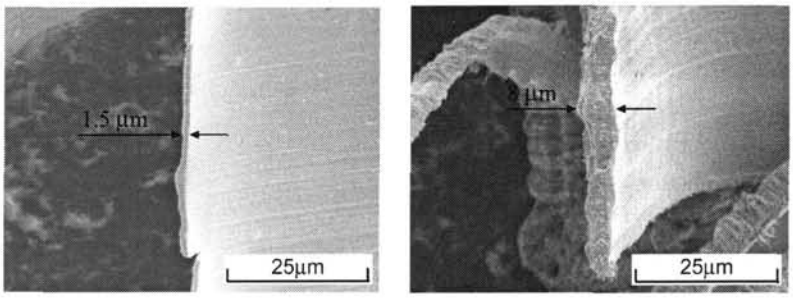


図 2-34　コーティングバイトにおけるコーティング層



(a) ダイヤモンドバイト　　(b) コーティングバイト

図 2-35　ダイヤモンドバイトおよびコーティングバイトによるチタン金属の超精密切削切りくずの比較
[*V*=60m/min, *f*=2μm/rev, *d*=1μm, *L*=212m]

摩耗していないダイヤモンドバイトを用いた場合，β型チタン合金であっても，図 2-35 に示すような切りくずが排出される．基本的に超精密切削加工における切りくず生成のメカニズムは，切りくずを観察する限りでは通常の切削と同じであると考えられる．切取り厚さがナノメートルオーダーになっても，工具の切れ味さえ良ければ安定した切りくずが生成される．刃先が鋭利なダイヤモンドバイトを用いて超精密切削した場合，図 2-35(a)に示されるように 1μm 程度の厚さの切りくずが生成される．一方，コーティングバイトを用いた場合は，図 2-35(b)に示すように 10μm 近い厚さの切

りくずが排出される．

図 2-36 にコーティングバイトを用いて超精密切削加工した際の仕上面の生成機構を図解したものを示す．ノーズ半径の大きなコーティングバイト刃先は，送り量 f=2μm/rev で移動する一方，切削方向へは，相対的に高速で移動する．その際，工具刃先のうち，バイト送り方向側の切込み深さ fp の大きい部分で切削を行う．一方，工具刃先の先端近傍となるバイト中央部付近では，切込み深さ fp が小さくなるため，図 2-36 2)の右上図に示すようにバニシングを行い，すくい面前面では，盛上り形成を行うと考えられる．そして，被削材が回転し，切削距離が増加するにつれて，バイト中央部前面の盛り上りは徐々に増大する．また，盛上りの一部は，幾何学的には，切削には関与しないバイト中央部よりも，よりバイト送り後端側（図 2-36 下図のバイト左側）にも流れ，仕上面粗さとして残存する．バイト中央部前面の盛上り量が切りくず形成のための最小切削深さと一致する切削加工点$(n_i)_m$の位置にバイトが来たとき，盛り上りは，図 2-36 1)の上図に示すように，バイト中央部前面でも刃先先端$(E_i)_m$によって切りくずとして排出される．その結果，図 2-36 2)のように，次に被削材が 1 回転してきた位置の$(n_i)_{m+1}$では，バイト中央部前面の盛り上りが小さくなり，次の盛り上りの増大過程に移る．最終的な仕上面粗さは，切削加工点$(n_i)_m$と$(n_{i+1})_1$との盛上り過程で発生すると考えられ，ダイヤモンドバイトの初期切削過程では，工具摩耗の影響が大きく，仕上面粗さ Hr=300nm(Rz)程度になると考えられる．

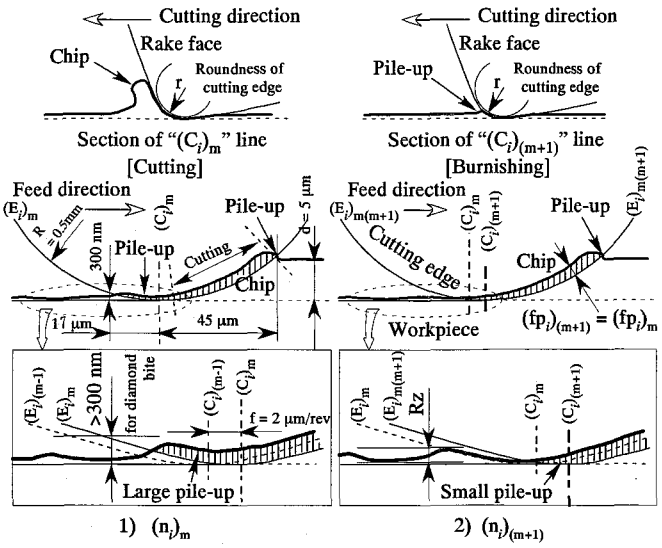


図 2-36　コーティングバイトによる超精密切削仕上面の生成機構 [1)]

2.4　小　括

本章では，単結晶ダイヤモンドバイト，超硬バイト，サーメットバイト，コーティングバイトの4種類のバイト材料，さらには，刃先形状を鋭利にした成形コーティングバイトについて，チタン金属の超精密切削仕上面に及ぼす影響を検討した．

以下に得られた結果を示す．

(1)単結晶ダイヤモンドバイトを用いてβ型チタン合金を超精密切削加工すると，短い時切削距離で工具刃先が大きく摩耗する．得られる仕上面粗さは *Hr*=200nm(*Rz*)程度となる．このことから，単結晶ダイヤモンドバイトは，本検討の切削条件で加工を行った場合，チタン金属の超精密切削加工への適用は困難であると考えられる．

(2)超硬バイトおよびサーメットバイトを用いて加工を行うと，比較的粗い工具刃先形状が，超精密切削仕上面に転写されて仕上面を形成する．その結果，仕上面粗さは，それぞれ *Hr*=448nm(*Rz*)程度，218nm(*Rz*)程度となる．

(3)コーティングバイトを用いた場合，55nm 程度の工具刃先稜線上の粗さが仕上面に転写され，仕上面粗さ *Hr*=129nm(*Rz*)程度が得られる．工具摩耗は，他のバイト材料よりも小さいが，すくい面にチタン合金の凝着が確認される．しかし，摩耗した工具刃先で加工しても，良好な仕上面が得られていることから，短い切削距離における超精密切削加工は，滑らかに摩耗した工具刃先が，仕上面に転写されることで実現されていると推測される．チタン金属の超精密切削加工において，コーティングバイトが，最も有用であることが確認された．

(4)コーティングバイトを用いて各種チタン金属を超精密切削加工すると，チタン合金が持つ結晶粒が観察できる鏡面加工を行うことができた．α–β型チタン合金の超精密切削仕上面では，結晶粒が非常に小さいために結晶粒界として観察することは難しい．仕上面粗さ *Hr*=52nm(*Rz*)程度であり，本研究の目標とする 100nm(*Rz*)以下の仕上面を形成することができた．一方，粒径 100μm を越える結晶粒を持つ純チタン（JIS Ⅱ種）では，結晶粒界段差の影響を受けて仕上面粗さが非常に大きくなる．WYKO による測定結果で仕上面粗さ *Hr*=171nm(*Rz*)程度の仕上面となった．

(5)刃先形状が整った成形コーティングバイトで加工すると，結晶粒界段差が減少し，仕上面粗さ *Hr*=98nm(*Rz*)程度の仕上面を得ることに成功した．しかし，コーティング層が除去されているためにチタン合金の凝着が，非常に広い範囲で確認された．

【参考文献】

1) 安井平司，坂本重彦，川田昌樹：チタン合金のコーティング工具による超精密切削加工，精密工学会誌，(2002)，Vol. 68，No. 7，pp. 928.

2) 岡田芳雄，兼広二郎，竹保義博：高精度仕上げ加工技術の研究（第1報）　難削材の高精密旋削加工技術の研究，広島県立東部工業技術センター研究報告，(1996)，No. 9，pp. 9

3) 鈴木教和，樋野励，益田真輔，社本英二：超硬合金の超精密楕円振動切削加工 ― 延性モード切削機構の検討 ―，精密工学会誌，(2005)，Vol. 72，No. 4，pp. 539

4) Ekkard Brinksmeier, Ralf Gläbe : Precision machining of steel with ultrasonically chilled diamond tools，Proceeding of American Society of Precision Engineering 2002，(2002)，Vol. 17，pp. 275

5) 坂本重彦，安井平司，篠﨑烈：チタン合金の超精密切削仕上面粗さに及ぼす不働態皮膜の影響，2004年度 精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集，(2004)，pp. 429

6) Shigehiko SAKAMOTO，Heiji YASUI，Akira SHINOZAKI，Takafumi SHINGAI，Tatsuya FURUNO : Development of Precision Coated-Cemented-CarbideTools for Ultra-Precision Cutting of Titanium andTitanium Alloys，Proc. of American Society for Precision Engineering 19th Annual Meeting，(2004)，pp. 634

7) 坂本重彦，安井平司，篠﨑烈：チタン金属の超精密切削仕上面に及ぼす成形コーティング工具の効果，2004年度 精密工学会春季大会学術講演会講演論文集，(2004)，pp. 931

8) 庄司克雄：超精密加工と非球面加工　超精密研削用ホイールと超精密切削用ダイヤモンドバイトの実際，株式会社 エヌ・ティー・エス，(2004)，pp. 318

第3章　工具切込み量が超精密切削仕上面粗さに及ぼす影響

3.1　緒　言

チタン金属に対する超精密切削加工を行うためには，多くの加工要素を特定し，加工に適した条件を選定することで，良好な仕上面性状を形成することができる．前章では，コーティングバイトが，チタン金属の超精密切削加工に有用であることを見出した．加工に用いる工具が決定したことから，加工条件を検討することで，さらに良好な仕上面が得られると考えられる．しかし，チタン金属の中でもβ型チタン合金においては，100nm(*Rz*)を越える結晶粒界段差が存在する．さらに純チタンでは，それ以上の結晶粒界段差が，仕上面粗さに影響を及ぼしていることを確認した．仕上面粗さ100nm(Rz)以下の平滑化された仕上面を得るためには，結晶粒界段差を小さくしなければならず，各種切削条件を検討することで，その効果が得られると考えられる．

切削条件の選定としては，コーティングバイトを用いた超精密切削加工における加工メカニズムを考え，工具送り量を検討した事例がある[1)-4)]．ダイヤモンドバイトのように，刃先稜方向の広い領域で整った工具刃先形状を得ることができれば，工具送り量を大きくしても，良好な仕上面粗さを得ることができる．これは，$Rz_{th}=f^2/(8*R)$で表される理論粗さ[5)]の関係からは算出できない原理であり，超精密切削加工における工具刃先形状の仕上面への転写性の影響が大きい[6),7)]．さらに，工具刃先稜が粗ければ，切削工具と被削材間の摩擦力が大きくなり，加工で発生する熱が高くなると考えられ，最終的には仕上面に加工変質層が発生する．加工時に工具刃先に生じる切削抵抗も，仕上面における加工変質層の形成や結晶粒界段差の発生に大きく影響すると考えられる．

ダイヤモンドバイトを用いた超精密切削加工では，工具切込み量を数マイクロメートルと比較的小さく設定する．しかし，工具切込み量が仕上面粗さに及ぼす影響を検討した研究[8)]は少なく，定量的なデータが得られていないのが現状である．また，コーティングバイトを用いた事例もいくつか報告されているが，得られるオーダーは，ミクロンオーダーもしくは，サブミクロンオーダーにとどまっており，超精密切削加工としての実用化は，難しいと考えられる[9)-12)]．

このような観点から，本章では，切削条件の一つである工具切込み量が，超精密切削仕上面粗さに及ぼす影響を検討した．本検討の目的は，最適な工具切込み量を選定することであり，特に超精密切削加工における仕上面形成のメカニズムを考えて，結晶粒界段差に関する検討を行った．β型チタン合金の結晶粒界段差を減少させるために，従来よりも小さな工具切込み量で超精密切削加工を行い，切削抵抗も含めて検討することで，その原理を追及した．

3.2　実験方法および加工条件

本章では，超精密切削仕上面生成に及ぼす工具切込み量の影響を検討している．本検討では，工作機械に超精密旋盤（東芝機械　ULC-100A）を使用して超精密正面旋削加工で行った．超精密旋盤に取り付けた工作物および切削工具などの実験外観を**図 3-1** に示す．**表 3-1** に前加工工具切込み量の影響を検討した加工条件を，**表 3-2** に仕上加工工具切込み量の影響を検討した加工条件を示す．工作物は，主としてβ型チタン合金を用い，純チタン，α–β型チタン合金についても検討を行った．工作物の形状は，直径ϕ50mm，厚さ t=10mm である．この工作物の円端面部分を切削する正面旋削で検討を行った．加工に用いた工具は，TiCNO 系コーティングを施したコーティングバイトである．また，仕上面粗さの向上を確認した条件で，さらなる向上を計るために成形コーティングバイト[3), 4)]を用いて比較検討を行っている．切削油剤は不水溶性切削油剤を使用し，工具送り方向から圧縮空気と共に切削点近傍にミスト供給した．

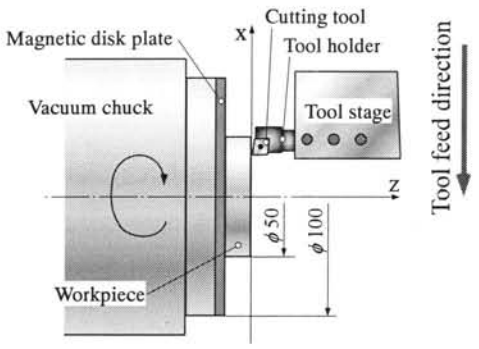


図 3-1　超精密切削加工の外観

前加工工具切込み量の影響を検討する実験では，前加工工具切込み量 d_p=0.5μm から 2μm, 5μm, 10μm, 20μm と 5 段階で設定して加工を行い，最後に仕上加工として d_f=5μm で仕上加工を行っている．仕上加工工具切込み量の影響を検討する実験では，前加工工具切込み量 d_p=5μm で加工し，仕上加工における工具切込み量を d_f=0μm から 5μm まで，0.5μm ごとに 9 段階で変えて仕上面粗さの検討を行っている．他の切削条件は，切削速度 V=47-60m/min，工具送り量 f=2μm/rev である．また，超精密切削仕上面を評価する切削距離を L=550m としている．

また，超精密切削加工中に発生する主分力および背分力を，バリオコンポ多成分力センサ（日本キスラー株式会社　3 成分力センサ 9117A1.5）を用いて測定し，工具切込み量の違いによる切削力を検討した．

表 3-1　超精密切削加工実験条件
（前加工における工具切込み量の影響）

Machine tool: Ultra-precision Lathe ULC-100A, Toshiba Machine CO., LTD.	
Cutting tool:	Coated-cemented-carbide tool Nose radius: 0.4 mm Rake angle: 0 deg Relief angle: 7 deg
Workpiece material:	β titanium alloy (Ti-22V-4Al)
Cutting fluid:	Water-immiscible type cutting fluid (Type Y)
Cutting conditions	Cutting speed : V = 47 - 60 m/min Cutting length : L = 550 m
【Preparation Cutting】	Depth of cut: d_p = 0.5 - 20 μm Feed rate: f_p = 2 μm/rev
【Finish Cutting】	Depth of cut: d_f = 5 μm Feed rate: f_f = 2 μm/rev

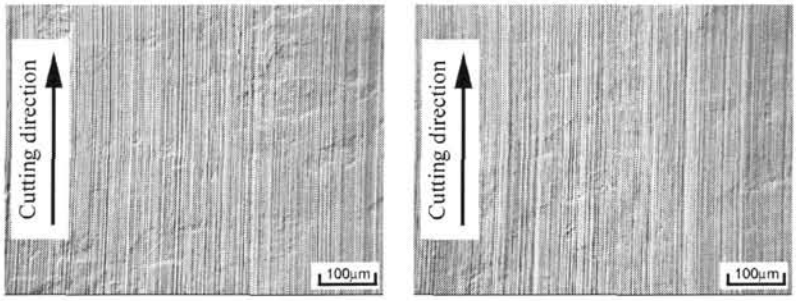
表 3-2　超精密切削加工実験条件
（仕上加工における工具切込み量の影響）

Machine tool: Ultra-precision Lathe ULC-100A, Toshiba Machine CO., LTD.	
Cutting tool:	Coated-cemented-carbide tool (Commercial tool, Formed tool) Nose radius: 0.4 mm Rake angle: 0 deg Relief angle: 7 deg
Workpiece material:	Pure titanium (JIS class Ⅱ) β titanium alloy (Ti-22V-4Al) α–β titanium alloy (Ti-6Al-4V)
Cutting fluid:	Water-immiscible type cutting fluid (Type Y)
Cutting conditions	Cutting speed : V = 47 - 60 m/min Cutting length : L = 550 m Depth of cut: d_f = 0 - 5 μm Feed rate: f_f = 2 μm/rev

3.3　実験結果および考察

3.3.1　前加工における工具切込み量が仕上面粗さに及ぼす影響

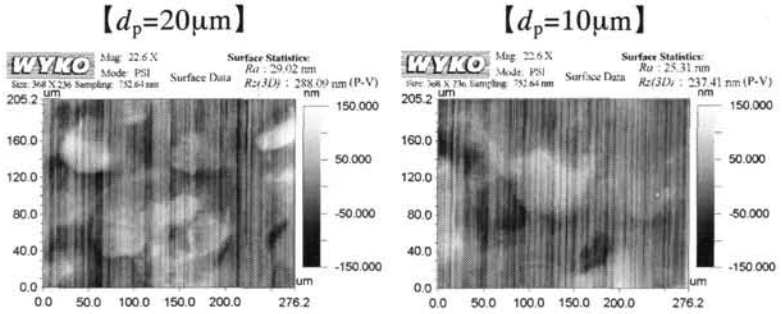
大きな結晶粒を持つ純チタンやβ型チタン合金の超精密切削加工における仕上面は，結晶粒界の段差による影響が大きい[1) - 3)]．特に前加工によって生じる影響を検討するために，前加工の工具切込み量を d_p=20μm および 10μm と比較的大きくして，仕上切込み量 d_f=5μm で加工して得られた超精密切削仕上面の微分干渉顕微鏡写真を**図 3-2** に示す．大きな前加工切込み量 d_p=20μm の後に仕上加工を施して得られた仕上面では，図 3-2(a)に示すように非常に大きな結晶粒界が明瞭に確認される．同様に，前加工切込み量 d_p=10μm で加工して得られた仕上面においても，図 3-2(b)に示すように明瞭に結晶粒界が観察される．



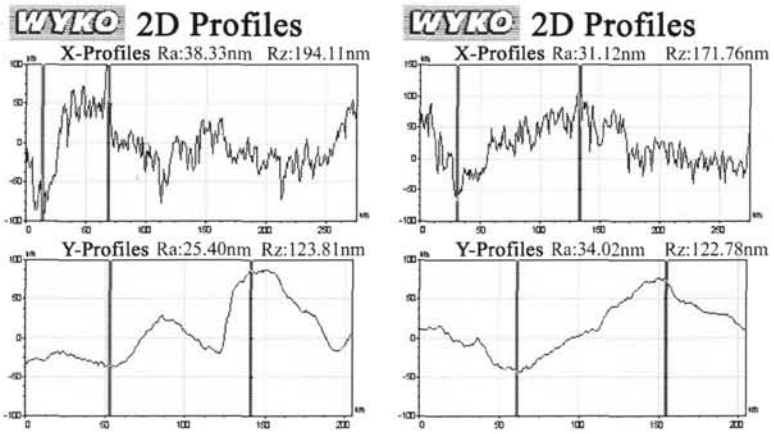
(a) d_p=20μm　　(b) d_p=10μm

図 3-2　前加工切込み量 d_p=20μm および 10μm で加工した超精密切削仕上面の比較

[V=60m/min, f_f=2μm/rev, d_f=5μm, L=550m]



(a) WYKO 3 次元測定結果

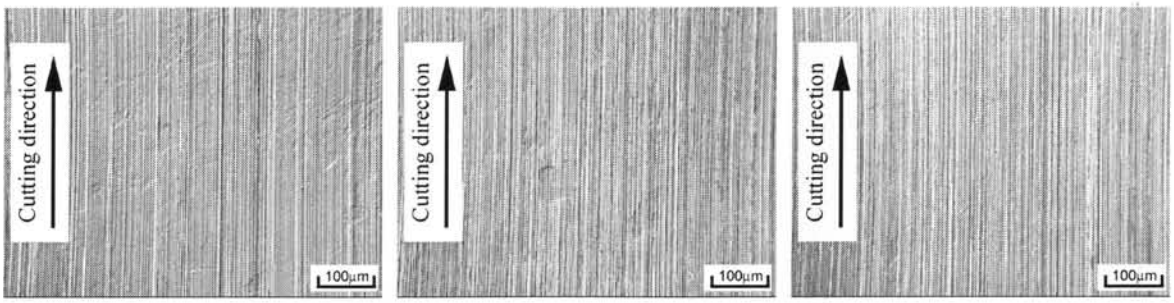


(b) WYKO 2次元測定結果

図 3-3　前加工切込み量 d_p=20μm および 10μm で加工した超精密切削仕上面の WYKO 測定結果

[V=60m/min, f_f=2μm/rev, d_f=5μm, L=550m]

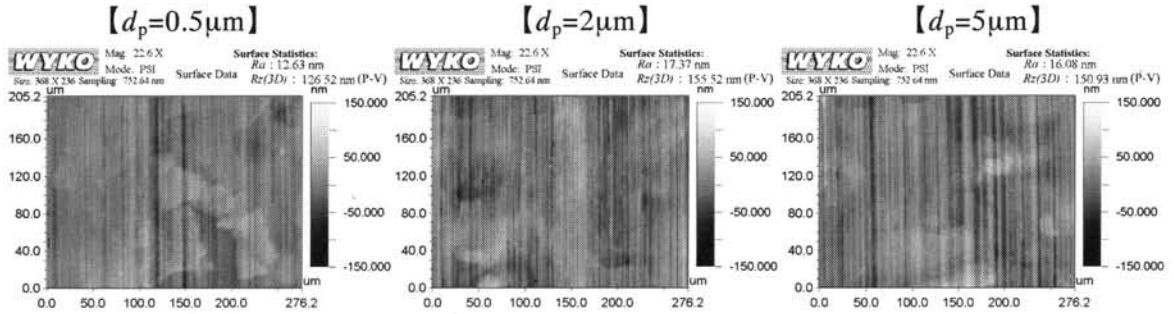
た結果を示す．どちらの測定結果においても粒径 100μm 程度の結晶粒が確認できる．図 3-3(a)に示されるように，□270×200μm の 3 次元仕上面粗さ $Hr_{(3D)}$=288nm(*Rz*)程度，$Hr_{(3D)}$=237nm(*Rz*)程度となっている．これらの仕上面を 2 次元的に解析した結果をみてみる．図 3-3(b)下図に示されるように，切削方向仕上面粗さにおいて，$Hr_{(cut)}$=120nm(*Rz*)



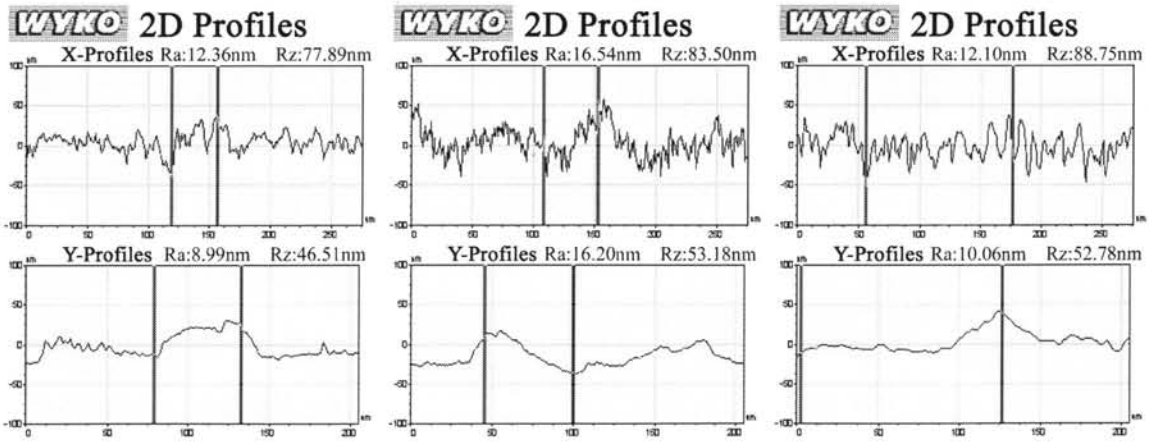
(a) d_p=0.5μm　　(b) d_p=2μm　　(c) d_p=5μm

図 3-4　前加工切込み量 d_p=0.5μm，2μm および 5μm で超精密切削した仕上面の比較

[V=60m/min，f_f=2μm/rev，d_f=5μm，L=550m]



(a) WYKO 3 次元測定結果



(b) WYKO 2次元測定結果

図 3-5　前加工切込み量 d_p=0.5μm，2μm および 5μm で加工した超精密切削仕上面の WYKO 測定結果

[V=60m/min，f_f=2μm/rev，d_f=5μm，L=550m]

を越える非常に大きな粒界段差が確認できる．図 3-3(b)上図に示す工具送り方向の仕上面粗さ曲線をみると，結晶粒界段差による影響と工具送りによる大きなうねりにより，非常に粗い粗さ曲線になっている．仕上面粗さは，それぞれ Hr=194nm(Rz)程度と Hr=172nm(Rz)程度になり，前加工による仕上面粗さの悪化がわかる．粒界段差は，どちらの前加工切込み量においても 120nm(Rz)程度である．しかし，工具送り方向仕上面粗さでは 20nm 程度の差がある．これは，前加工によって生じた前加工面の比較的深い加工変質層が，最終的な仕上面に影響しているものと考えられる．

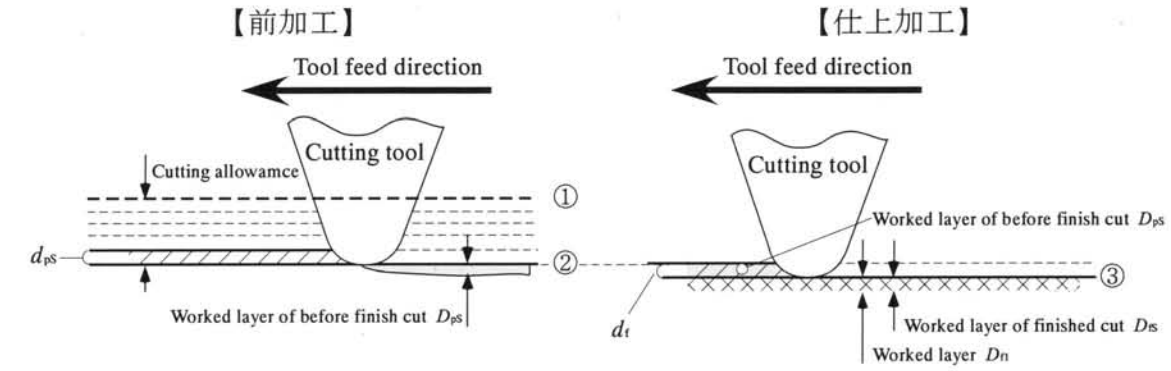
図 3-4 に，前加工切込み量を d_p=0.5μm，2μm，5μm と小さくしてβ型チタン合金を超精密切削し，仕上切込み量 d_f=5μm で加工して得られた超精密切削仕上面の微分干渉顕微鏡写真を示す．図 3-4(a)に示す前加工切込み量 d_p=0.5μm で加工した仕上面においては，一部に非常に深い切削条痕が観察される．図 3-2 に示したような明瞭な結晶粒界段差は観察されない．図 3-4(b)(c)に示す前加工切込み量 d_p=2μm および d_p=5μm で超精密切削して得られた仕上面では，深い条痕により微分干渉の色の変化が見られる．図 3-4(a)に示す前加工切込み量 d_p=0.5μm の仕上面と同様に，明瞭な結晶粒界は確認されないが，比較的規則正しく刻まれた切削条痕が，かすかに途切れる程度で結晶粒界が観察される仕上面になっている．

図 3-5 に，前加工切込み量 d_p=0.5μm，2μm，5μm で超精密切削して得られた仕上面の粗さの WYKO 測定結果を示す．図 3-5(a)に示されるように，いずれの工具切込み量で前加工を行った仕上面においても，結晶粒界は確認しづらくなっている．得られた超精密切削仕上面の 3 次元仕上面粗さは，前加工切込み量 d_p=0.5μm の仕上面で $Hr_{(3D)}$=127nm(Rz)程度，d_p=2μm で $Hr_{(3D)}$=156nm(Rz)程度，d_p=5μm で $Hr_{(3D)}$=151nm(Rz)程度である．いずれの仕上面においても，結晶粒の影響が小さく，良好な仕上面が得られている．これらの仕上面を，工具送り方向および切削方向で解析した結果をみてみる．図 3-5(b)下図に示すように，切削方向の仕上面粗さにおいては，100nm(Rz)を越えていた結晶粒階段差が，前加工切込み量 d_p=0.5μm の仕上面で $Hr_{(cut)}$=47nm(Rz)程度，d_p=2μm で $Hr_{(cut)}$=53nm(Rz)程度，d_p=5μm で $Hr_{(cut)}$=53nm(Rz)程度まで減少して小さくなっている．結晶粒階段差の減少を受けて，工具送り方向の仕上面粗さ曲線では，大きなうねり成分による波形が確認されにくくなっている．前加工切込み量 d_p=0.5μm における工具送り方向の仕上面粗さは Hr=78nm(Rz)程度となった．前加工切込み量の影響で最終的に得られる仕上面粗さも変わる．工具切込み量 d_p=2μm で Hr=84nm(Rz)程度，d_p=5μm で Hr=89nm(Rz)程度となり，工具切込み量を小さく設定して加工することで，仕上面から数マイクロメートルの深さに生じる加工変質層の影響を小さくすることができると考えられる．

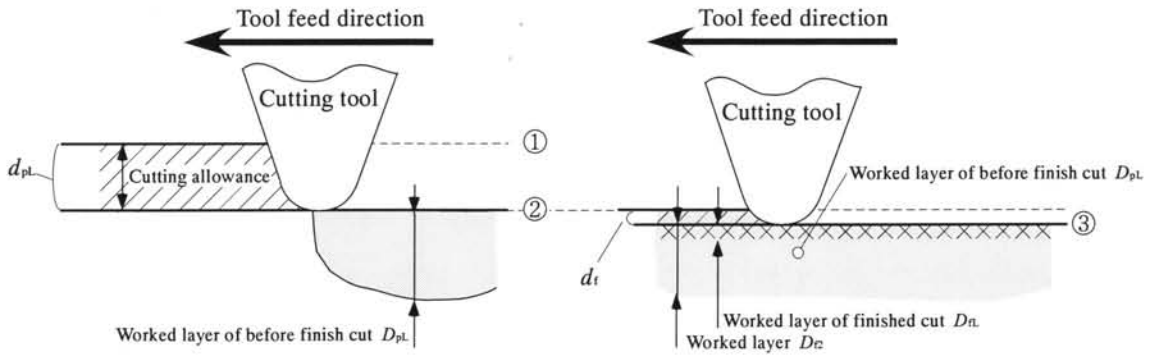
図 3-6 に，前加工切込み量による加工変質層の影響を図解したものを示す．本検討

で行った実験結果を基に考えると，工具切込み量を大きくすることで，加工変質層が，より深い領域まで発生するということが考えられる [13]．図 3-6(a)に示す前加工切込み量が小さい場合は，取り代部分を同量の切込み量 d_{ps} で数回に分けて前加工を行えば，新たに生じる加工変質層は小さくなり，前加工の段階で生じた加工変質層が D_{pS} という深さとなる．この場合，前加工による加工変質層 D_{pS} が，仕上加工切込み量 d_f よりも小さくなれば，この部分が仕上加工によって削り取られ，新たに発生する加工変質層は D_{fs} となる．したがって，最終的な仕上面における加工変質層の深さは，仕上加工で発生したものが最終的な加工変質層となるので D_{f1} となる．一方，前加工切込み量が大きい場合は，図 3-6(b)に示されるように，前加工工具切込み量 d_{pL} で加工した場合に生じる加工変質層は比較的深く D_{pL} という深さになる．仕上加工における工具切込み量は d_f であるので，仕上加工により生じる加工変質層は前加工の場合と同程度の D_f であると推測できる．しかしながら，仕上加工を行っても，前加工の加工変質層部が深いために除去されず，最終的に仕上面から D_{f2} の深さで残る．その結果，結晶粒に対する影響が大きくなり，仕上面粗さが悪化したと考えられる．

本検討における切削距離は L=550m であるので，切削初期過程であると考えられる．



(a)前加工切込み量が小さい場合



(b)前加工切込み量が大きい場合

①Surface of before cutting　②Surface of preparation cutting　③Finished surface

図 3-6　前加工切込み量による加工変質層の影響

前加工切込み量を d_p=20μm とした場合，仕上面粗さ 200nm(*Rz*)のうち結晶粒界段差の影響による粗さは 120nm(*Rz*)程度である．一方，d_p=5μm 以下に設定した仕上面では，仕上面粗さ 110nm(*Rz*)程度に対して結晶粒界段差の影響が 50nm(*Rz*)程度である．したがって，結晶粒界段差の影響を除いた仕上面粗さの悪化量は，それぞれ 80nm (*Rz*)および 60nm(*Rz*)であることから，前述した加工変質層の影響による結晶粒界段差の増加が仕上面粗さに大きく影響し，最終的な仕上面粗さの悪化が生じていると考えられる．

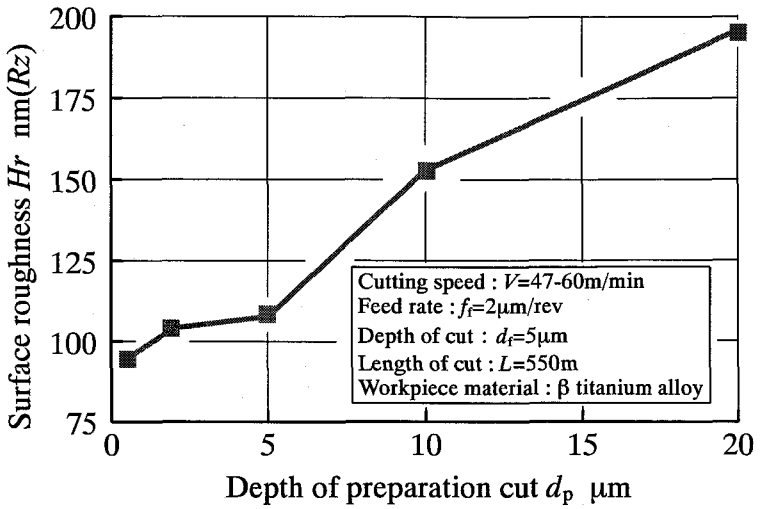
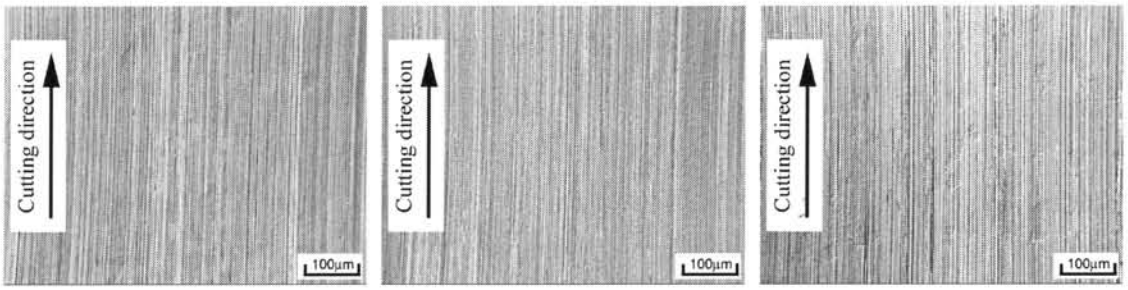


図 3-7　前加工切込み量と仕上面粗さの関係

これまでの結果より，**図 3-7** に前加工切込み量と仕上面粗さの関係を示す．最終的な超精密切削仕上面では，切削方向の仕上面粗さで $Hr_{(cut)}$=100nm(*Rz*)以上の粒界段差が存在していたが，前加工における工具切込み量を小さく設定することで，粒界段差が半分程度まで減少する．その結果，前加工切込み量を小さくすることで加工変質層を薄くすることができ，前加工切込み量 d_p=0.5μm では 2 次元仕上面粗さ *Hr*=78nm(*Rz*)程度の仕上面が得られた．しかし，100nm(*Rz*)程度の仕上面を得るためには，前加工切込み量 d_p=5μm 程度でも可能であると考えられる．良好な仕上面をより効率的に得ることができる条件を決定することで，加工の高能率化を実現できる．そこで，前加工切込み量を d_p=5μm として，次節で仕上切込み量の影響を検討した．

3.3.2　仕上加工における工具切込み量が仕上面粗さに及ぼす影響

前項において，チタン合金の超精密切削加工における前加工切込み量は，最終的に得られる超精密切削仕上面の仕上面粗さに大きく影響することを確認した．本項では，前加工切込み量を d_p=5μm と設定して加工し，仕上加工における工具切込み量が仕上面粗さに及ぼす影響を検討した．なお，本検討は，工具切込み量 d_f=0μm から 5μm まで，0.5μm ごとに設定して 9 種類の工具切込み量で行った．

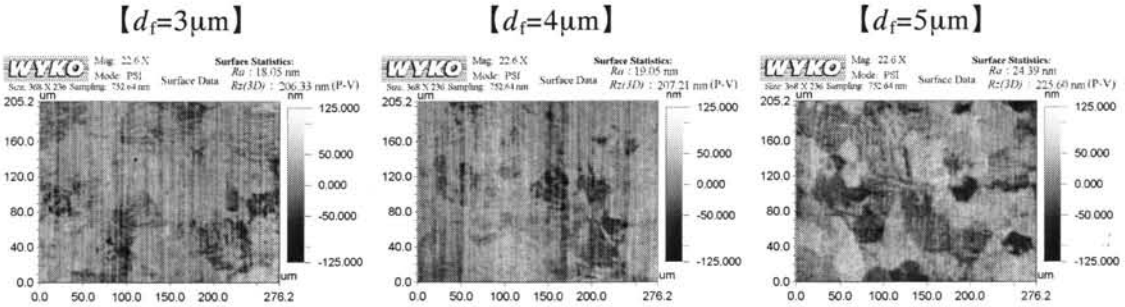


(a) d_f=3μm　　(b) d_f=4μm　　(c) d_f=5μm

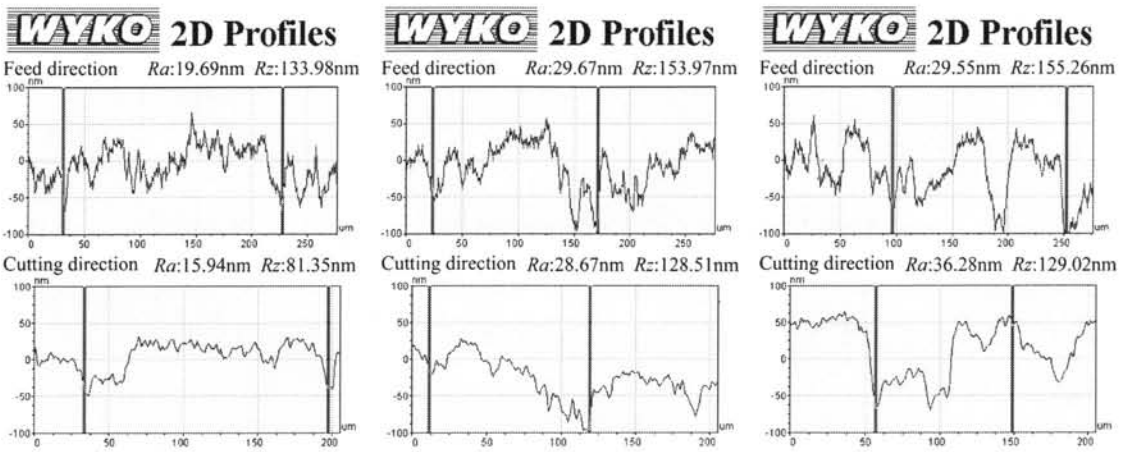
図 3-8　工具切込み量 d_f=3，4，5μm で加工したβ型チタン合金の超精密切削仕上面
[V=60m/min，f_f=2μm/rev，d_f=3-5μm，L=550m]

図 3-8 に，工具切込み量 d_f=3μm，4μm，5μm で加工して得られた超精密切削仕上面の微分干渉顕微鏡観察結果を示す．図 3-8 に示すように各工具切込み量で加工した仕上面では，いずれもβ型チタン合金の粒径 100μm 程度の結晶粒が観察される．また，図 3-8(b)(c)に示される仕上面では，特に深い切削条痕が観察され，仕上面の顕微鏡観察領域において，安定した切削状態が得られなかったことがわかる．

図 3-9 に，図 3-8 に示す仕上面の WYKO 測定結果を示す．WYKO 測定結果をみると，いずれの工具切込み量においても，結晶粒界が観察されている．その結果，3 次元仕上面粗さは，図 3-9(a)左図に示すように工具切込み量 d_f=3μm で加工した仕上面で $Hr_{(3D)}$=206nm(Rz)程度，図 3-9 中央に示される d_f=4μm で $Hr_{(3D)}$=207nm(Rz)程度，図 3-9 右図の d_f=5μm で $Hr_{(3D)}$=226nm(Rz)程度となった．これらの仕上面を工具送り方向および切削方向で解析した結果をみてみると，図 3-9(b)に示すように，β型チタン合金の大きな結晶粒界段差が存在していることがわかる．工具切込み量 d_f=3μm で加工した仕上面の切削方向仕上面粗さ $Hr_{(cut)}$=81nm(Rz)程度，d_f=4μm での切削方向仕上面粗さ $Hr_{(cut)}$=129nm(Rz)程度，d_f=5μm での切削方向仕上面粗さ $Hr_{(cut)}$=129nm(Rz)程度であり，d_f=3μm の場合のみ 100nm(Rz)よりも小さくなっているが，d_f=4，5μm のいずれの場合も 100nm(Rz)を大きく上回る粒界段差であることが確認できる．このように比較的大きな粒界段差を含む工具送り方向の仕上面粗さを検討する．図 3-9(b)上図に示すように，いずれの仕上面粗さ曲線においても，図 3-9(b)下図に示す結晶粒界段差の影響を受けて，



(a) WYKO 3 次元測定結果



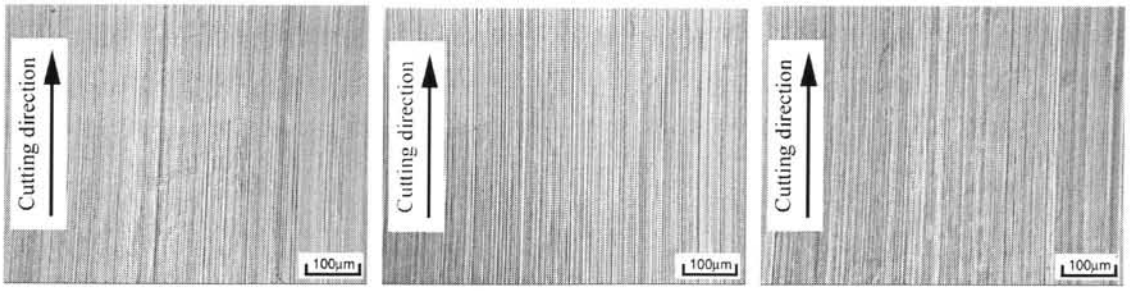
(b) WYKO 2次元測定結果

図 3-9　工具切込み量 d_f=3，4，5μm で加工したβ型チタン合金の超精密切削仕上面 WYKO 測定結果

[V=60m/min，f_f=2μm/rev，d_f=3-5μm，L=550m]

大きな波の変化となっている．曲線上には小さな周期の波も確認できることから，切削条痕に加えて，深い溝，結晶粒界段差およびうねりの成分が関連しているものと考えられる．測定される工具送り方向の仕上面粗さは，工具切込み量 d_f=3μm の場合で Hr=134nm(Rz)程度，d_f=4μm で Hr=154nm(Rz)程度，d_f=5μm の場合で Hr=155nm(Rz)程度となった．仕上面粗さを測定して検討したところ，結晶粒の粒界段差は，仕上面粗さに大きく影響することがわかった．工具切込み量を d_f=3μm とすることで，粒界段差は，わずかに減少するが仕上面粗さは，依然として粒界段差の影響を受け，2 次元仕上面粗さ Hr=100nm(Rz)を越える．仕上加工における工具切込み量を d_f=3，4，5μm として超精密切削加工を行った場合に得られる仕上面は，ほぼ同程度の仕上面粗さを持つ仕上面であるということがわかった．

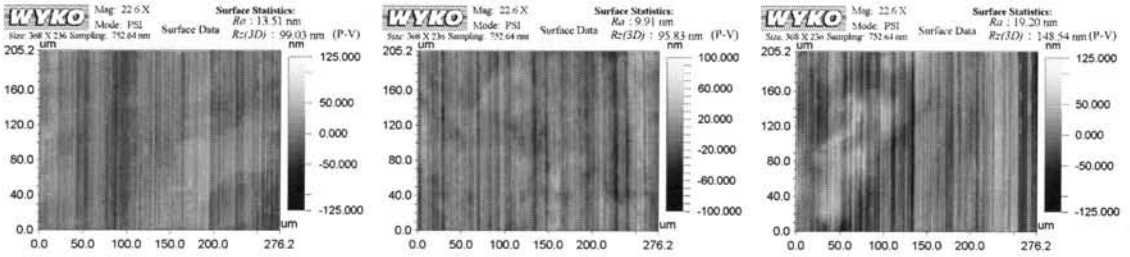
非常に大きな結晶粒界段差をもつβ型チタン合金の超精密切削仕上面において，この段差を小さくすることを目標として，仕上加工における工具切込み量を d_f=1.5μm，2μm，2.5μm と設定して超精密切削した．加工して得られた超精密切削仕上面の微分



(a) d_f=1.5μm　　(b) d_f=2μm　　(c) d_f=2.5μm

図 3-10　工具切込み量 d_f=1.5，2，2.5μm によるβ型チタン合金の超精密切削仕上面

[V=60m/min，f_f=2μm/rev，d_f=1.5-2.5μm，L=550m]



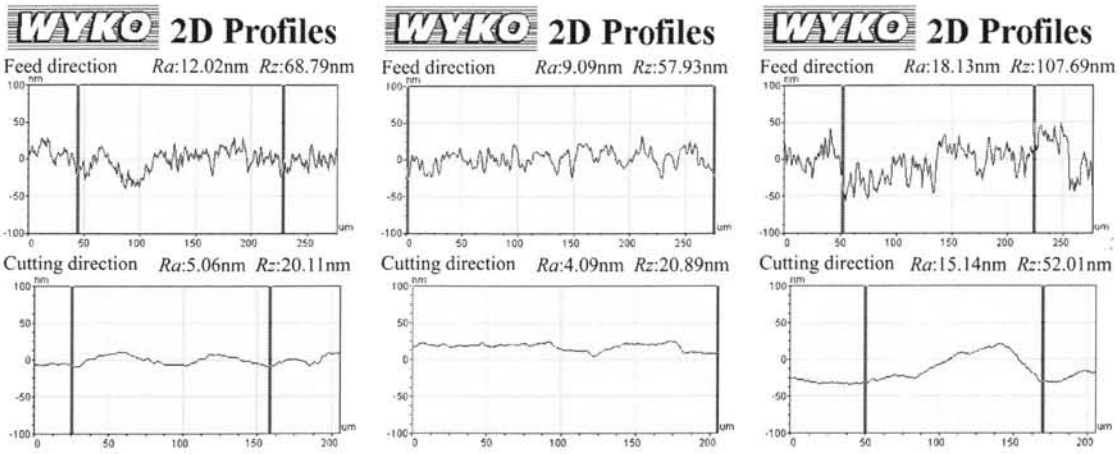
(a) d_f=1.5μm　　(b) d_f=2μm　　(c) d_f=2.5μm

図 3-11　工具切込み量 d_f=1.5，2，2.5μm で加工したβ型チタン合金の超精密切削仕上面 3 次元 WYKO 測定結果

[V=60m/min，f_f=2μm/rev，d_f=1.5-2.5μm，L=550m]

干渉顕微鏡写真を**図 3-10** に示す．仕上面を見ると図 3-10(c)に示されるように，d_f=2.5μm で超精密切削した場合のみ，結晶粒界が明瞭に確認できる．他の工具切り込み量で加工した仕上面では，ほとんど結晶粒界は確認されない．また，深い切削条痕がみられるのも d_f=2.5μm の仕上面のみであり，他の仕上面では，ほぼ一様な仕上面性状になっているのがわかる．

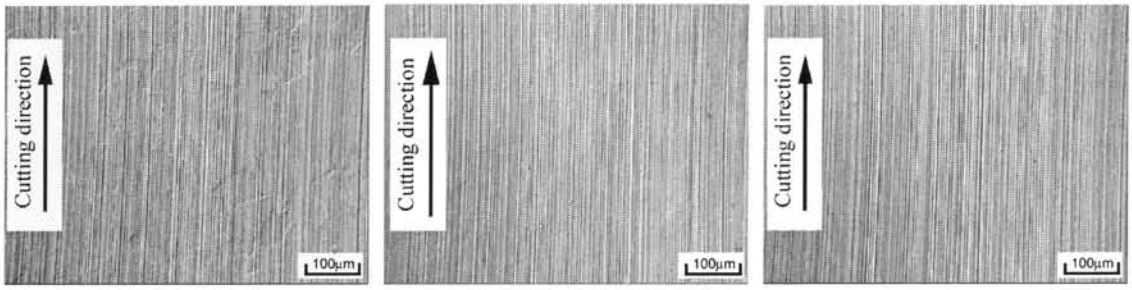
これらの仕上面を WYKO で測定した結果は，**図 3-11** に示される．深い切削条痕と結晶粒界が，はっきりと観察された工具切込み量 d_f=2.5μm の仕上面では，3 次元仕上面粗さ $Hr_{(3D)}$=149nm(Rz)程度となった．仕上面粗さとしては，100nm(Rz)を越えているが，粒界段差の影響を考えると，比較的，小さな粗さであることがわかる．一方，仕上面において，結晶粒界が確認しづらくなっていた工具切込み量 d_f=1.5μm および 2μm の仕上面粗さをみると，WYKO 測定結果でも，結晶粒界がほとんど観察できず，得られた 3 次元仕上面粗さは $Hr_{(3D)}$=99nm(Rz)程度，96nm(Rz)程度である．工具切込み量を比較的小さくすることで，目標としている 100nm(Rz)という仕上面粗さが得られている．これらの仕上面の工具送り方向および切削方向で解析を行った．図 3-12(c)に示す



(a) d_f=1.5μm　　(b) d_f=2μm　　(c) d_f=2.5μm

図 3-12　工具切込み量 d_f=1.5，2，2.5μm で加工したβ型チタン合金の超精密切削仕上面 2 次元 WYKO 測定結果

[V=60m/min，f_f=2μm/rev，d_f=1.5-2.5μm，L=550m]



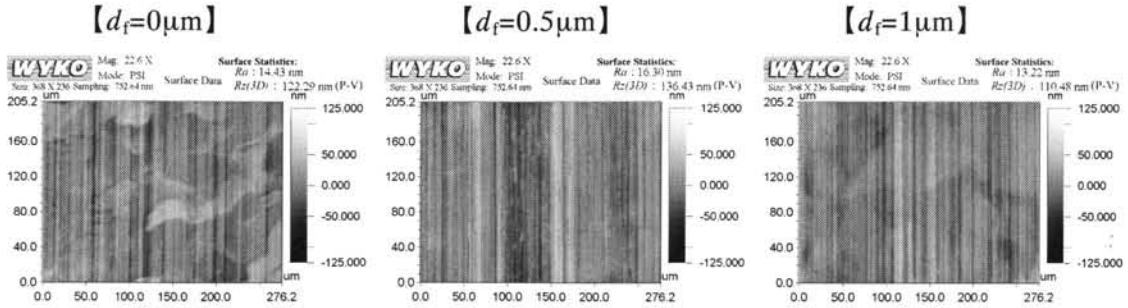
(a) d_f=0μm　　(b) d_f=0.5μm　　(c) d_f=1μm

図 3-13　工具切込み量 d_f=0，0.5，1μm によるβ型チタン合金の超精密切削仕上面

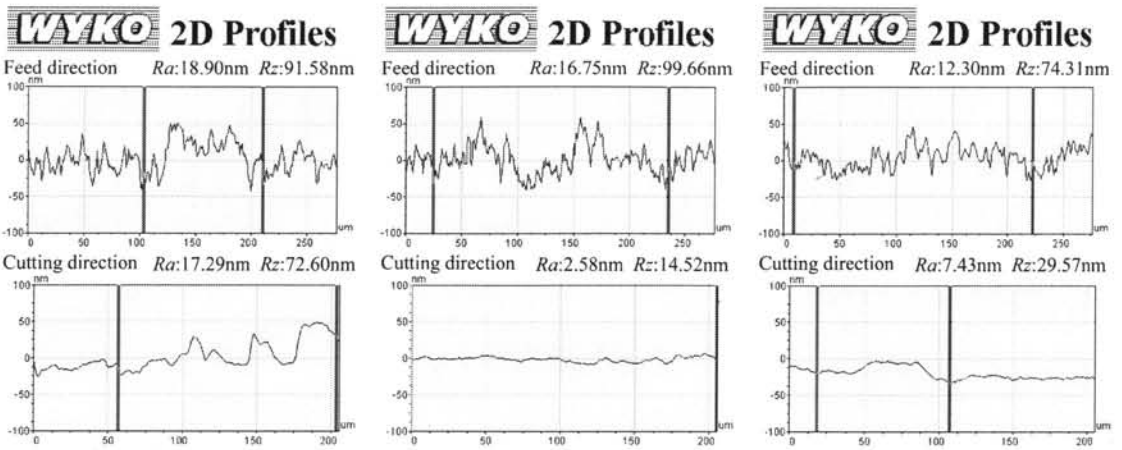
[V=60m/min，f_f=2μm/rev，d_f=0-1.0μm，L=550m]

工具切込み量 d_f=2.5μm の切削方向の仕上面粗さより，結晶粒界段差が 100nm(Rz)よりも非常に小さくなっていることがわかる．さらに工具切込み量を d_f=1.5μm，2μm とした仕上面では，図 3-12(a)(b)に示すように，結晶粒界段差が $Hr_{(cut)}$=21nm(Rz)程度まで小さくなっていることがわかる．このような切削方向の仕上面粗さの大きな減少が生じた結果，工具送り量の仕上面粗さは，図 3-12(c)に示すように d_f=2.5μm の仕上面で Hr=108nm(Rz)程度となった．工具切込み量を d_f=1.5μm，2μm とした場合は，それぞれ Hr=69nm(Rz)程度，Hr=58nm(Rz)程度となり，大きく仕上面粗さが向上しているのがわかる．

図 3-13 に，さらに工具切込み量を小さく設定して超精密切削した場合の仕上面顕微鏡観察結果を示す．工具切込み量を d_f=0.5μm，1μm とした場合の超精密切削仕上面では，図 3-10(b)に示す工具切込み量 d_f=2μm として加工した場合の仕上面と同様に，



(a) WYKO 3 次元測定結果



(b) WYKO 2次元測定結果

図 3-14　工具切込み量 d_f=0，0.5，1μm で加工したβ型チタン合金の超精密切削仕上面 WYKO 測定結果

[V=60m/min，f_f=2μm/rev，d_f=0-1μm，L=550m]

結晶粒界がほとんど観察されない．また，観察領域全体にわたってほぼ一様な仕上面であるように見える．

一方，加工機の設定上工具切込み量を 0μm として加工した仕上面では，図 3-13(a)に示すように結晶粒界を観察することができる．これらの仕上面を WYKO で測定した結果は，**図 3-14** に示される．いずれの仕上面粗さを見ても，3 次元仕上面粗さ $Hr_{(3D)}$=140nm(Rz)以下である．d_f=2.5μm の場合と同程度の粗さであることがわかる．さらに，2 次元仕上面粗さを見てみる．図 3-14(b)上図に示すように，2 次元仕上面粗さは，いずれの仕上面でも Hr=100nm(Rz)を下回っている．特に，工具切込み量 d_f=1μm では，2 次元仕上面粗さ Hr=74nm(Rz)程度であり，非常に良好な加工ができていると考えられる．図 3-13(b)下図に示す切削方向の仕上面粗さをみると，工具切込み量 d_f=0μm において $Hr_{(cut)}$=73nm(Rz)程度で最大結晶粒界段差が確認できる．工具切込み量 d_f=0.5μm および d_f=1μm の場合は，$Hr_{(cut)}$=30nm(Rz)以下であることから，工具切込み量が小さいほど，粒界段差の生成が小さくなるとは考えることは難しい．そもそも，

工具切込み量 d_f=0μm とは，一度前に加工した仕上面であることから，理論上は加工中に切りくずを排出することはないと考えられる．しかしながら，実際の加工では，加工中に切りくずを排出していたことから，工具切込み量 d_f=0μm で加工する前に加工された仕上面において，仕上面よりも高い部分があったと考えられる[14]．この原理を考えると，図 2-36 に示した切削条痕の生成よりも広いピッチで起こるうねり成分が影響していると考えられる．このうねり成分は，加工の進行において，工具刃先ではバニシング加工が行われ，すくい面前面では，盛上り形成を行うと考えられる．そして，被削材が回転して切削距離が増加すると，バイト中央部前面の盛り上りは徐々に増大する．また，盛上りの一部は，バイト送り後端側にも流れ，本来の切り取られた仕上面よりも大きな仕上面粗さとして残存する．その結果，工具切込み量を d_f=0μm として切削加工しても，うねり成分が切り取られて，切りくずを排出していると考えられる．

特に図 3-9 に示す 2 次元仕上面粗さを見ると，工具送り量の f_f=2μm/rev よりも広い間隔のうねり成分が確認される．これまで示してきたダイヤモンドバイトやコーティングバイトで切削した結果をみると，理論仕上面粗さ $Hr_{th}=f^2/8R$ で算出される粗さ Hr_{th}=1nm(*Rz*)と比較すると非常に大きく，図 3-9 に示されるように相当大きな溝幅である 10 数μm 程度の切削条痕で形成されていることがわかる．このようにうねり成分のみが切削され，結晶粒界段差分が切り取られなかったために，図 3-13(a)に示す仕上面が形成されたと考えられる．これらの結果より，工具切込み量は，工具送り方向および切削方向の仕上面を形成する機構に対して大きく影響し[15), 16)]，良好な仕上面を加工するためには，最適な工具切込み量を決定することが重要であるといえる．

図 3-15 に，仕上加工における工具切込み量と得られた仕上面粗さの関係を示す．図 3-15 に示す仕上面粗さの変化を見ると，工具切込み量 d_f=3μm において，2 次元仕上面粗さ *Hr*=122nm (*Rz*)となる．d_f=2.5μm における仕上面粗さはほぼ同程度である．一方，d_f=2μm 以下においては，2 次元仕上面粗さ *Hr*=100nm(*Rz*)以下となった．一回目の加工か

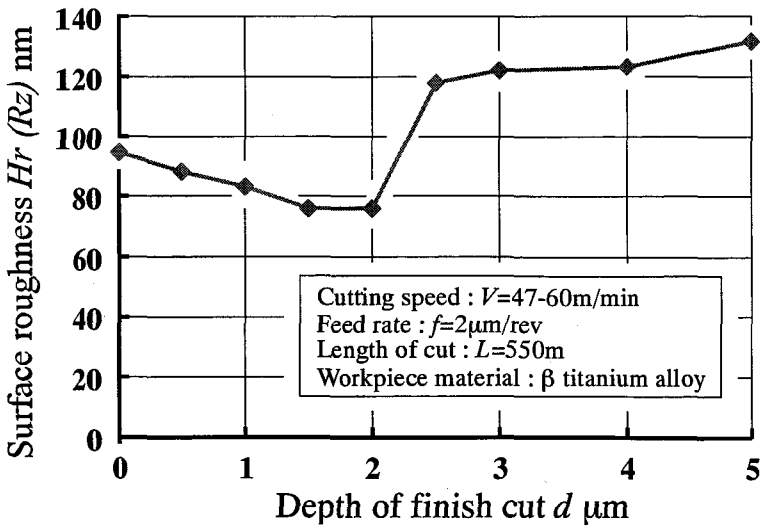


図 3-15　β型チタン合金の超精密切削における仕上工具切込み量と仕上面粗さの関係

ら切込まずに設定した d_f=0μm では，2次元仕上面粗さ Hr=92nm(Rz)となり，仕上面粗さは大きくなるが，d_f=3μm 以上の場合ほど粗くなることはなく，うねり成分が減少した良好な仕上面となった．

このように工具切込み量を d_f=2μm と小さく設定して加工することで，良好な仕上面を得られることがわかった．このことを調べるために，加工中に生じる切削抵抗の測定を行った．測定して得られた結果は，**図 3-16** に示される．なお，測定した仕上切込み量は d_f=5μm および，最も仕上面粗さが向上した d_f=2μm である．また，測定は加工時間 15 秒程度（切削距離 L=50m 程度）である．切削抵抗測定結果をみると，図 3-16 に示されるように，いずれの工具切込み量の場合においても，背分力の方が主分力よりも大きいことがわかる．そして，主分力と背分力は，工具切込み量 d_f=5μm では，それぞれ 0.8N および 1.5N 程度である．工具切込み量 d_f=2μm では，それぞれ 0.2N および 0.7N 程度である．工具切込み量 d_f=2μm で加工した場合に主分力および背分力がいずれも小さくなっているのがわかる．このうち，背分力が減少することで仕上面に生じる弾性回復量が小さくなり，粒界段差が減少したと推測している．

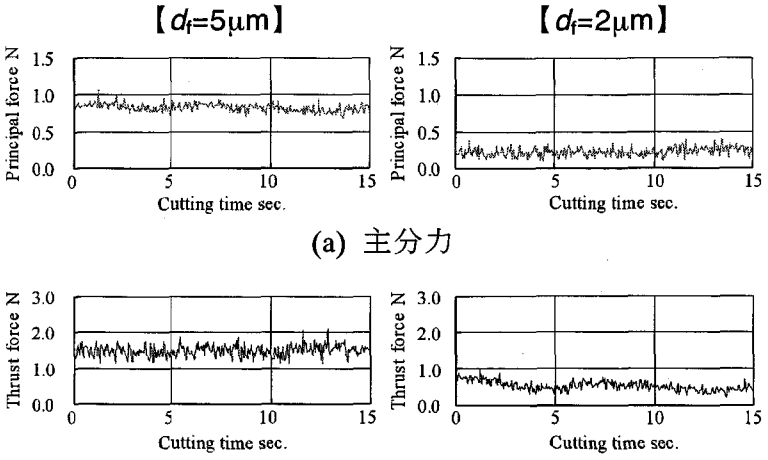


図 3-16　仕上工具切込み量 d_f=5μm および 1μm における超精密切削抵抗の比較

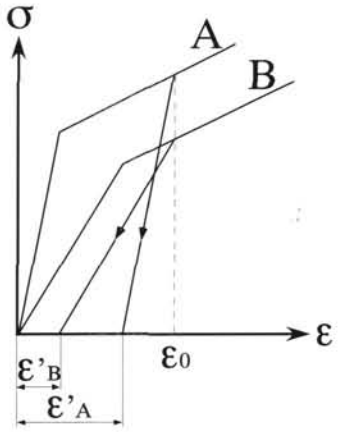
[V=60m/min，f_f=2μm/rev，d_f=2, 5μm，L=50m]

超精密切削仕上面における結晶粒界段差発生メカニズムを図示したものを**図 3-17** に示す．本検討では，材料中に存在する結晶方位の異なる結晶粒をそれぞれ結晶粒 A，結晶粒 B として単軸圧縮モデルを想定した．各結晶粒にかかる応力と生じる歪の関係は図 3-17(a)に示されるように，図 3-17(b)における結晶粒上面が前加工面である状態から，塑性変形域の歪 ε_0 まで両結晶粒を圧縮応力により変形させる．その後，負荷を除去すると，図 3-17(c)に示すように，結晶粒が持つ弾性回復力により歪 ε_0 の位置よりも高いところまで弾性回復する．この時，前加工表面から弾性回復した面との差を，それぞれ ε'_A，ε'_B とする．これが塑性変形して元の高さまで弾性回復しきれなかった塑性変形量である．歪量の違いは，結晶方位が異なることによる弾性異方性，加工硬化の異方性などによるものである [17]．したがって，弾性回復量は，塑性変形歪 ε_0 と各 ε'_A，

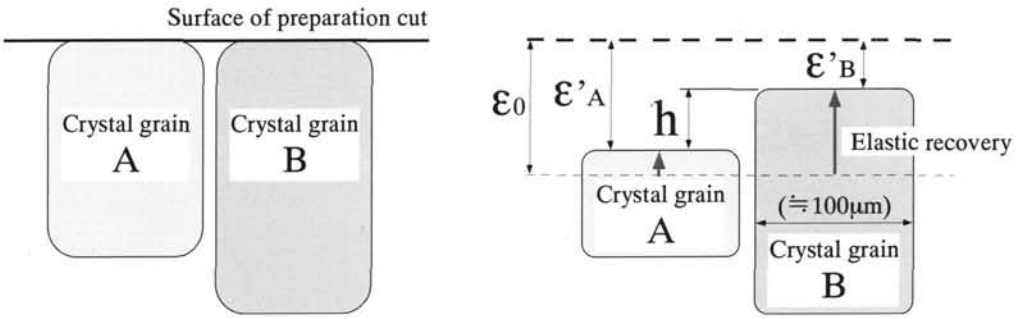
ε'_B との差になるが，この量を厳密に求めることは非常に難しいと考えられる．最終的な結晶粒界段差 h は，各弾性回復量の差として次式（3-1）で求められる．

$$h = \varepsilon'_A - \varepsilon'_B \qquad (3\text{-}1)$$

工具切込み量 d=5μm の仕上面では，結晶粒界段差は 100nm(Rz)程度である．図 3-16 に示すように工具切込み量を小さくすることで主分力および背分力が半分程度減少したことから，結晶粒を押さえつける力が減少して，それぞれの結晶粒における弾性回復量が半分程度まで減少し，結晶粒界段差が 50nm 程度まで減少したと考えられる．



(a) 応力-歪線図



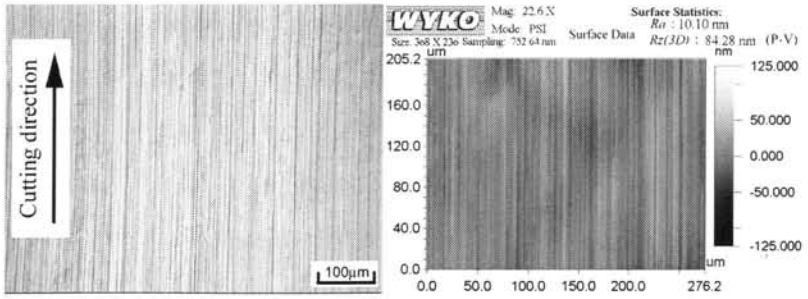
(b) 加工前の結晶粒　　(c) 加工後の結晶粒

図 3-17　結晶粒界段差発生のメカニズム

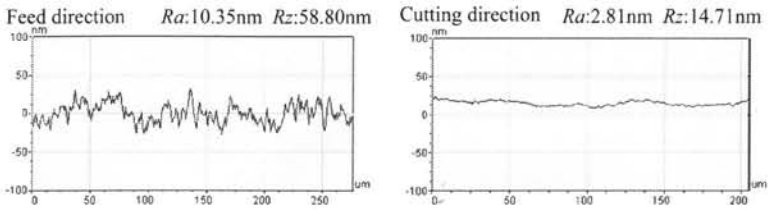
さらに仕上面粗さを向上させるために，工具刃先稜を研摩して鋭利にした成形コーティングバイト [3), 17)]を用いて，β型チタン合金の超精密切削加工を試みた．成形コーティングバイトを用いて，仕上工具切込み量 d_f=2μm で加工して得られた仕上面の微分干渉顕微鏡観察像および仕上面 WYKO 測定結果を**図 3-18** に示す．図 3-18(a)に示される超精密切削仕上面においては，一部に深い切削条痕が観察されるが，切削条痕がはっきりと刻まれており，結晶粒界が観察しづらくなっているのがわかる．図 3-18(a)に示される仕上面を WYKO で測定した結果をみると，仕上面が一様になり，結晶粒界が確認しづらくなっている影響で，3 次元仕上面粗さ $Hr_{(3D)}$=84nm(Rz)程度の非常に良好な仕上面になっている．工具送り方向および切削方向の仕上面粗さをみると，図 3-18(c)右図に示す切削方向の仕上面粗さにおいては，細かい凹凸が観察されず，非常になめらかな仕上面形状になっていることがわかる．切削方向の仕上面粗さ $Hr_{(cut)}$=15nm(Rz)程度であり，粒界段差が大きく減少していることがわかる．工具送り方向の仕上面粗さをみると Hr=59nm(Rz)程度であるが，粗さ曲線における深い条痕は

観察されず，仕上面のうねり成分および粒界段差が減少している影響で，仕上面粗さが向上している．

図 3-19 に，市販コーティングバイトおよび成形コーティングバイトを用いてβ型チタン合金を超精密切削加工した際に排出される切りくずについて，走査型電子顕微鏡を使用して観察した結果を示す．切りくず形状は図 3-19 に示されるように，市販コーティングバイトでは短く湾曲した形状となっている．一方，成形工具による切りくずは，直線的に連続している．切りくずの幅を比較すると，成形コーティングバイトの方が市販コーティングバイトよりも半分程度と狭く，50μm 程度であることが分かる．切りくずの工具すくい面側を比較すると，図 3-19 のように市販コーティングバイトでは，深い条痕が観察される．成形コーティングバイトでは，整った刃先稜が転写されているため，一部に盛上りのような条痕が観察されるが，比較的平滑化された切りくずであることがわかる．工具すくい面逆側では，市販コーティングバイトおよび成形コーティングバイト共にせん断による段差を生じ，多くのしわを生じている．市販コーティングバイトでは，切りくずに工具刃先の比較的大きな粗さが転写されるため，切りくずの厚さが一定に制御できず，薄くなった箇所で切断されて短くなっていると考えられる．一方，成形により刃先稜の粗さ



(a) 超精密切削仕上面　　(b) WYKO3 次元測定結果



(c) WYKO 2次元測定結果

図 3-18　成形コーティングバイトを用いて d_f=2μm で加工して得られたβ型チタン合金超精密切削仕上面

[V=60m/min，f_f=2μm/rev，d_f=2μm，L=550m]

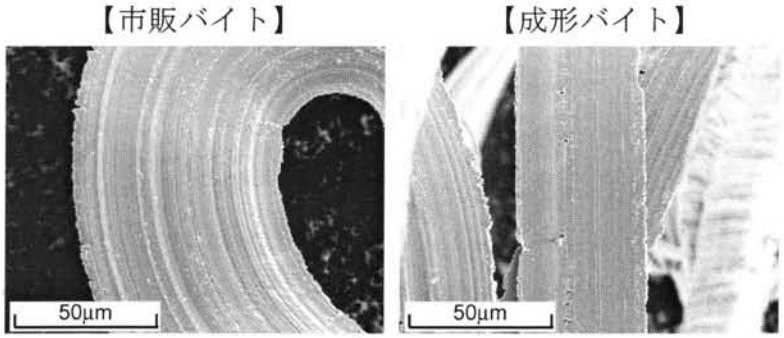


図 3-19 市販バイトおよび成形バイトでβ型チタン合金を超精密切削した際の切りくず比較

[V=60m/min，f_f=2μm/rev，d_f=2μm，L=550m]

が小さくなった成形コーティングバイトでは，小さな粗さが切りくずに転写されるが，切りくずの厚さ方向における変動が小さいために長く連続した切りくずが排出されていると考えられる．したがって，成形コーティングバイトの長く連続した切りくずは，切りくず排出性の観点で仕上面に与える影響が小さいために，仕上面粗さが向上したと考えられる．

チタン金属の超精密切削加工において，工具刃先丸みを市販工具の r=8μm から成形工具の r=1μm まで小さくする[17]ことで，よりスムーズな切りくずが排出され，結晶粒の粒界段差が減少した．成形コーティングバイトによる仕上面では，整った刃先形状が仕上面に転写されている[3), 13)]ため，送り量と一致する間隔で規則正しい間隔の切削条痕が刻まれている．

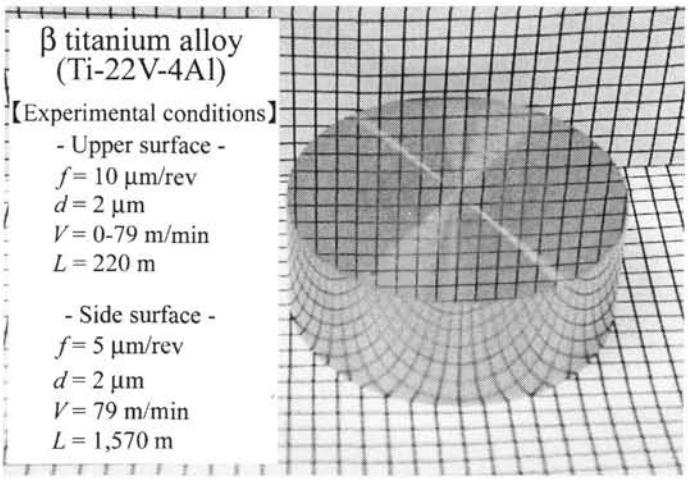


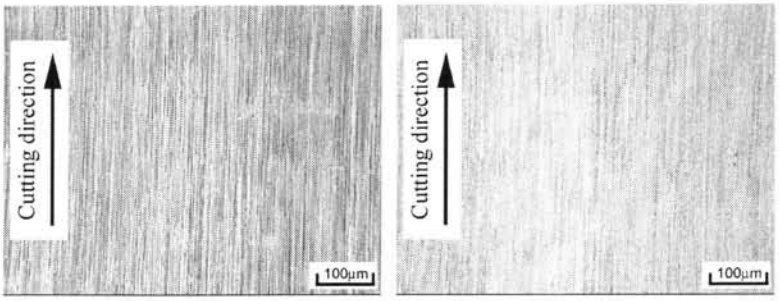
図 3-20　仕上切込み量 d_f=2μm によるβ型チタン合金の超精密切削仕上面

図 3-20 に，市販コーティングバイトでチタン合金を鏡面加工した仕上面を示す．コーティングバイトを用いて，工具切込み量を d=2μm として，直径 50mm のチタン合金の端面および側面を超精密切削することにより，側面および仕上面に格子模様が明瞭に映る鏡面加工が行われていることがわかる．

3.3.3　各種チタン金属の超精密切削仕上面粗さの向上

前項において，100nm (*Rz*)以上の結晶粒界段差を有するβ型チタン合金の超精密切削加工において，仕上加工における工具切込み量を d_f=2μm と設定することで，3 次元仕上面粗さ $Hr_{(3D)}$=96nm (*Rz*)の鏡面を得られるがわかった. 図 2-20 および図 2-21 に示すように，コーティングバイトを用いて，純チタンおよびα–β型チタン合金を超精密切削して得られる仕上面には，仕上面粗さを基準として評価すると，ある程度の限界があると考えられる. そこで, 本項では, 純チタンおよびα–β型チタン合金についてもβ型チタン合金と同様の加工条件で超精密切削加工を行い，各種チタン金属における仕上面粗さの向上を試みた.

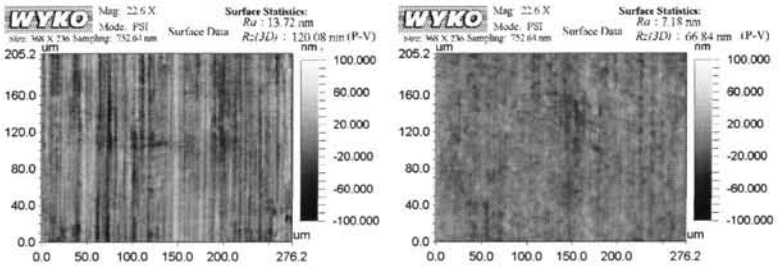
純チタンおよびα–β型チタン合金に対して，仕上加工における工具切込み量を d_f=2μm として超精密切削加工を行って得られた仕上面の顕微鏡観察結果は, 図 3-21 に示さ



(a) 純チタン（JIS Ⅱ種）　(b) α–β型チタン合金

図 3-21　仕上切込み量 d_f=2μm による各種チタンの超精密切削仕上面

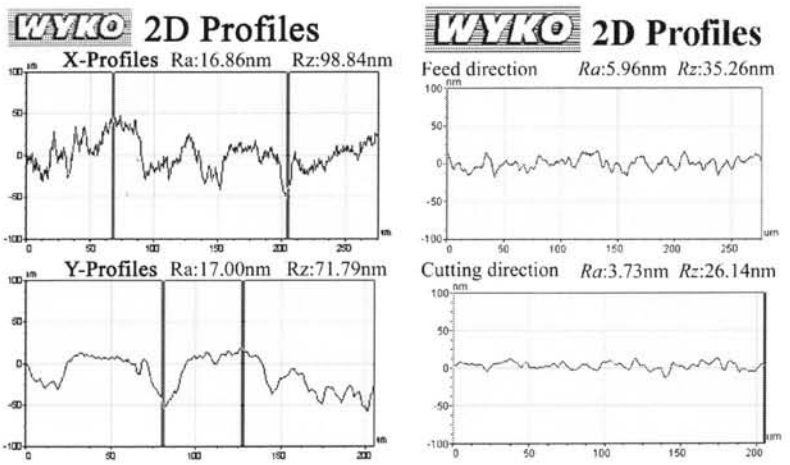
[V=60m/min, f_f=2μm/rev, d_f=2μm, L=550m]



(a) 純チタン（JIS Ⅱ種）　(b) α–β型チタン合金

図 3-22　各種チタンの超精密切削仕上面 WYKO 測定結果

[V=60m/min, f_f=2μm/rev, d_f=2μm, L=550m]



(a) 純チタン（JIS Ⅱ種）　(b) α–β型チタン合金

図 3-23　各種チタンの超精密切削仕上面 WYKO 2 次元測定結果

[V=60m/min, f_f=2μm/rev, d_f=2μm, L=550m]

れる．図 3-21(a)に示す純チタンの超精密切削仕上面では，図 2-20(a)ではっきりと観察されていた結晶粒界が確認しづらくなっている．図 3-21(b)に示すα–β型チタン合金の超精密切削仕上面では，切削条痕は，付着物と見られる膜で覆われており，はっきりと観察することは難しい．しかし，さらに拡大して観察した結果では，規則正しい間隔の明瞭な切削条痕が観察されていることから，良好な超精密切削仕上面であることがわかる．

これらの仕上面を WYKO により測定した結果を**図 3-22** に示す．図 3-22(a)に示す純チタンの超精密切削仕上面では，図 2-21 で観察されていた結晶粒が観察しづらくなっており，3 次元仕上面粗さ $Hr_{(3D)}$=120nm(*Rz*)程度まで向上した．一方，良好な仕上面となったα–β型チタン合金の場合，3 次元仕上面粗さ $Hr_{(3D)}$=67nm(*Rz*)程度となり，大きく 100nm(*Rz*)を下回る仕上面が得られた．

図 3-23 に，仕上面を WYKO で測定して，工具送り方向および切削方向について解析した結果を示す．図 3-23(a)に示される純チタンの仕上面は，工具送り方向において比較的大きなうねりが確認されるが，仕上面粗さ *Hr*=99nm(*Rz*)程度となった．切削方向の仕上面粗さをみると，図 2-22(a)においてβ型チタン合金の結晶粒の大きさを越える結晶粒界が確認されたが，その粒界段差は $Hr_{(cut)}$=72nm(*Rz*)程度まで減少している．この影響で純チタンの超精密切削仕上面が，100nm(*Rz*)以下の仕上面に向上している．一方，α–β型チタン合金の 2 次元仕上面粗さをみてみる．図 3-23(b)に示すように，工具送り方向の仕上面粗さにおいては，とても良好な仕上面が得られているのがわかる．2 次元仕上面粗さは，*Hr*=35nm(*Rz*)程度であり，図 2-22(b)に示す仕上面よりも，さらに高平滑化された仕上面になっている．切削方向の仕上面粗さは $Hr_{(cut)}$=26nm(*Rz*)であり，他のチタン合金と比較すると切削方向粗さの減少量は最も小さいが，工具送り方向の仕上面粗さは 35nm(*Rz*)となり，非常に良好な仕上面が得られた．これらの結果を見ると，仕上加工における工具切込み量を d_f=2μm と小さくすることで，いずれのチタン金属においても，切削方向の粗さが減少し，工具送り方向の仕上面粗さが向上することが確認された．

切削方向仕上面粗さにおいて，粒界段差が $Hr_{(cut)}$=40nm(*Rz*)程度減少した純チタンに関して，β型チタン合金と同様に，仕上工具切込み量と仕上面粗さの関係を検討した．**図 3-24** に純チタンの超精密切削加工における仕上工具切込み量と仕上面粗さの関係を示す．仕上工具切込み量 d_f=5μm における仕上面粗さは *Hr*=150nm(*Rz*)程度で大きくなるが，d_f=2.5μm から 4μm における仕上面粗さは *Hr*=130nm(*Rz*)程度で大きな変化はなかった．工具切込み量 d_f=2μm においては，粒界段差 100nm(*Rz*)を越える結晶粒が存在する純チタンにおいて仕上面粗さは *Rz*=99nm(*Rz*)であり，100nm よりも，わずかではあるが良好な仕上面が得られた．さらに工具切込み量を小さくするにしたがって，

仕上面粗さは大きくなる．しかし，仕上工具切込み量 d_f=0μm における仕上面粗さは Hr=125nm(Rz) 程度であり，d_f=3μm 以上の場合ほど粗くなることはなく，仕上面における結晶粒界段差が $Hr_{(cut)}$=70nm(Rz)程度まで減少した良好な超精密切削仕上面となった．純チタンにおいて，図 3-20 に示すβ型チタン合金と同様に，より平滑化された鏡面となる仕上面を得ることができた．

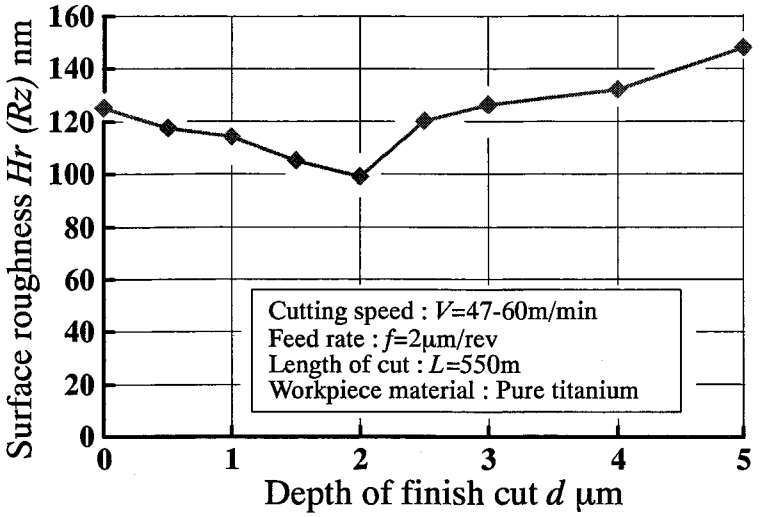


図3-24　純チタンの超精密切削における仕上工具切込み量と仕上面粗さの関係

3.4　小　括

本章では，切削条件の一つである前加工および仕上加工における工具切込み量が，超精密切削仕上面粗さに及ぼす影響を検討した．切削条件の一つである最適な工具切込み量を選定するために，β型チタン合金を主として，純チタンおよびα-β型チタン合金に対する実験を行い，各種チタンに関する工具切込み量の影響を検討した．

以下に得られた結果を示す．

(1)β型チタン合金の超精密切削加工において，前加工における工具切込み量は仕上面粗さに影響することがわかった．前加工切込み量を小さくすることによって，加工変質層を薄くすることにつながり，前加工切込み量 d_p=0.5μm では，最終的に d_f=5μm で仕上加工を行うことで，2次元仕上面粗さ *Hr*=78nm(*Rz*)の仕上面が得られた．

(2)仕上面粗さ 100nm(*Rz*)程度の仕上面を得るためには，前加工切込み量 d_p=5μm 程度でも可能であることがわかった．良好な仕上面をより効率的に得ることができる条件を決定することで，加工の高能率化を実現できると考えられる．

(3)前加工切込み量 d_p=5μm で加工し，仕上工具切込み量 d_f=2.5μm から 5μm の範囲で加工した場合，仕上面粗さ *Hr*=120nm(*Rz*)を越える仕上面となる．これらの仕上面では，$Hr_{(cut)}$=80nm(*Rz*)よりも大きな結晶粒界段差を含んでいる．

(4)仕上工具切込み量を d_f=2μm 以下にすると結晶粒界段差が $Hr_{(cut)}$=50nm(*Rz*)程度まで減少し，得られる仕上面粗さは *Hr*=100nm(*Rz*)以下になる．特に，d_f=2μm とした場合，最終的な2次元仕上面粗さ *Hr*=58nm(*Rz*)まで向上する．仕上加工時の工具切込み量を小さく設定すると，切削点に生じる主分力および背分力が半分程度まで減少して，加工による結晶粒の弾性回復量が小さくなる．また，仕上面における粒界段差よりも大きな粗さを持つうねりが除去され，その結果，2次元仕上面粗さは *Hr*=155nm(*Rz*)から 58nm(*Rz*)に向上した．

(5)純チタンにおいても同様の検討を行った結果，仕上工具切込み量 d_f=2μm において，結晶粒界段差が 50nm 程度減少し，得られた超精密切削仕上面の2次元仕上面粗さは，*Hr*=171nm(*Rz*)から 99nm(*Rz*)に向上した．

(6)結晶粒が非常に小さなα-β型チタン合金に対して，仕上工具切込み量を d_f=2μm として超精密切削したところ，切削方向における仕上面粗さの大きな変化は見られなか

った．しかしながら，超精密切削仕上面におけるうねり成分が除去されることにより，仕上面粗さ *Hr*=35nm(*Rz*)程度まで向上させることができた．

【参考文献】

1) 安井平司，坂本重彦，川田昌樹：チタン合金のコーティング工具による超精密切削加工，精密工学会誌，(2002)，Vol. 68，No. 7，　pp. 928
2) 坂本重彦：チタン金属（Ti）の鏡面加工，2002年度精密工学会秋季大会シンポジウム資料，(2002)，pp. 7
3) 篠崎烈：成形コーティング超硬バイトによるチタン金属の超精密切削に関する研究，精密工学会九州支部 第3回学生研究発表講演会講演論文集，(2002)，pp. 204
4) Shigehiko Sakamoto, Heiji Yasui : Ultra-precision cutting of titanium alloy with the formed coated-cemented-carbide tool，Proceeding of the euspen international topical conference, (2003)，Vol. 2，pp. 257
5) 丸井悦男：超精密加工学，株式会社コロナ社，(1997)，pp. 83
6) 井川直哉：超精密切削加工の原理，超精密生産技術大系実用技術，フジテクノシステムズ，(1994)，No. 2，pp. 33
7) 丸井悦男：超精密加工学，株式会社コロナ社，(1997)，pp. 57
8) 岩田一明，森脇俊道，奥田孝一：超精密ダイヤモンド切削における切りくず生成－無酸素銅の超微小切込み切削－，日本機械学会第946回講演会超精密加工技術講演概要集，(1987)，No. 870-7，pp. 27
9) 横沢毅，西岡孝夫，広田哲也，鈴木節男：高硬度材の高速加工技術，東京都立産業技術研究所研究報告，(1999)，No. 2，pp. 33
10) 篠崎賢二，生田明彦，増田秀基，山根八洲男，黒木英憲，有年雅敏，深谷保博：難削材切削時の凝着機構に関する基礎的研究（第1報）―各種Ti合金と超硬工具との凝着性評価方法の提案―，精密工学会誌，(2000)，Vol. 66，No. 2，　pp. 224
11) J. Schmütz　E. Brinksmeier　E. Bischoff : Sub-surface deformation in vibration cutting of cupper，Precision Engineerring，(2001)，Vol. 25，No. 3，　pp. 218
12) 鈴木教和，樋野励，益田真輔，社本英二：超硬合金の超精密楕円振動切削加工 ― 延性モード切削機構の検討 ―，精密工学会誌，(2005)，Vol. 72，No. 4，　pp. 539
13) 小林昭，井川直哉ほか：加工技術データファイル　第10巻（超精密・微細加工・材料データ・測定技術）第2章超精密切削加工の原理，(財) 機械振興協会　技術研究所，(1986)，No. 10，pp. 34

14) 坂本重彦，安井平司，篠崎烈：チタン金属の超精密切削加工における前加工切込み深さが仕上面粗さに及ぼす影響，精密工学会九州支部　大分地方講演会講演論文集，(2003)，pp. 99

15) Shigehiko SAKAMOTO，Heiji YASUI，Akira SHINOZAKI : Influence of Cutting on Surface Roughness of Ultra-Precision Face-Turned Titanium Alloys，Proc. of 4th euspen International Conference - Glasgow – England -，(2004)，pp. 185

16) 坂本重彦，安井平司，篠崎烈：チタン金属超精密切削の粒界段差に及ぼす工具切込み量の影響，2003 年度 精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集，(2003)，pp. 260

17) 坂本 重彦，安井 平司，篠崎 烈：チタン金属の超精密切削仕上面に及ぼす成形コーティング工具の効果，2004 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集，(2004)，pp. 931

第４章　低切削速度が超精密切削仕上面粗さに及ぼす効果

4.1　緒　言

チタン金属の超精密切削加工において，各種バイト材料の中でも普通切削に用いられるコーティングバイトが，最も有用であるということが第２章で確認された．コーティングバイトを用いて仕上面粗さ Hr=200nm(Rz)程度の仕上面を得られる切削距離は L=2,000m 付近である[1), 2)]．本研究で目標としている仕上面粗さ Hr=100nm(Rz)の仕上面は，切削距離 L=500m 程度まで得ることができる[3)]．しかしながら，実用化を考えれば，さらなる切削距離の延長が望まれる．

超精密切削仕上面の形成には，工具刃先形状が大きく影響することを前章で示した．加工することで工具刃先は摩耗し，加工前の整った刃先性状ではなくなる．工具摩耗の進行が早ければ，要求される仕上面を長い切削距離に渡って得ることは非常に困難になる．単に工具寿命を考えれば仕上面粗さの悪化は，工具逃げ面摩耗幅の増加量が大きく関係する．逃げ面摩耗の増加には，チタン合金の超精密切削加工の場合，工具刃先におけるチタン合金の凝着が大きく影響し，粗くなった工具刃先形状が仕上面に転写されることで，仕上面が悪化すると考えられる．

さらに，チタン合金の超精密切削仕上面粗さの変化は，工具摩耗の増加によって大きな変化が生じるというわけではなく，材料の特性である結晶粒界段差が大きく影響することが，これまでの検討で確認された．工具摩耗に加えて結晶粒界段差の抑制方法が開発されれば，β型チタン合金を超精密切削して得られる仕上面粗さ基準の工具寿命の改善が行えるとともに，他の金属材料の超精密切削加工への適用も期待することができると思われる．

このようなことから，本章では，切削過程における仕上面粗さの増加に関係する工具摩耗は，切削温度によって大きく影響されると考え，まず，切削温度上昇抑制に大きな影響を持つと考えられる低切削速度の効果を，β型チタン合金の超精密切削加工において検討した．コーティングバイトによるチタン合金の超精密切削加工において，最適な切削速度を選定し，仕上面粗さ Hr=100nm(Rz)以下の良好な仕上面を，より長い切削距離で得ることを目的としている．また，前章では，工具切込み量を d=2μm と小さく設定することで良好な結果を得ることができた．本章では，高平滑な仕上面を，より高切込み量で高能率に加工することを目標として，各種検討を行った．

4.2　実験装置および加工条件

本章では，低切削速度が超精密切削仕上面粗さに及ぼす影響について検討した．工作機械に超精密旋盤（東芝機械　ULC-100A）を使用して超精密正面旋削加工で行った．超精密旋盤に取り付けた工作物および切削工具などの実験外観を**図 4-1** に示す．**表 4-1** に超精密切削加工条件を示す．工作物は，直径ϕ50mm，厚さ t=10mm のβ型チタン合金を用いた．加工に用いた工具は，TiCNO 系のコーティングバイトである．切削油剤は不水溶性切削油剤を使用し，工具送り方向から圧縮空気と共に切削点近傍にミスト供給した．

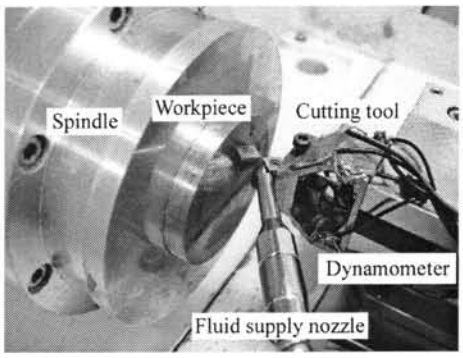


図 4-1　超精密切削加工の外観

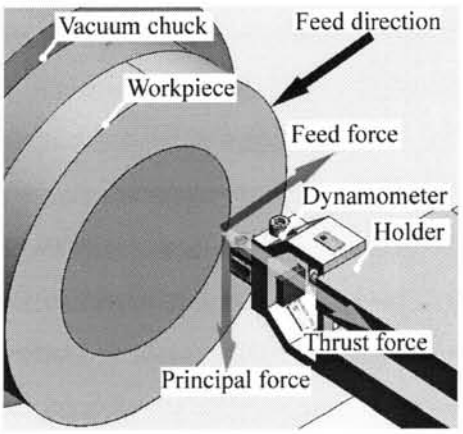


図 4-2　切削抵抗概要およびシステム構成

検討した切削速度は，極低切削速度 V<1m/min，低切削速度 V=15m/min，中切削速度 V=60m/min および高切削速度 V=110m/min である．工具切込み量は d=5μm，100μm，500μm，1,000μm である．主軸 1 回転あたりの工具送り量は f=2μm/rev と固定して検討を行った．工具寿命の検討は，切削距離 L=10,000m まで行った．

図 4-2 に，切削抵抗測定装置および超精密切削 3 分力を示す．本装置は，超精密切削抵抗を測定するために開発された，八角形弾性リング動力計を応用した六角形状弾性リング動力計 [4]である．加工中に生じる主分力および背分力を測定して検討した．なお，本装置の固有振動数は主分力方向で 1.6kHz，配分力方向で 1.5kHz と比較的高い値である．装置剛性は，主分力方向 0.016mm/g，背分力方向 0.012mm/g であり，加工には，ほとんど影響しないと考えられる．

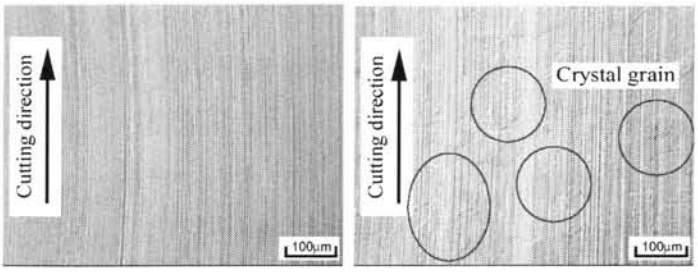
表 4-1　超精密切削加工実験条件

Machine tool:	Ultra-precision Lathe ULC-100A, Toshiba Machine CO., LTD.
Cutting tool:	Coated-cemented-carbide tool
	Nose radius: 0.4 mm
	Rake angle: 0 deg
	Relief angle: 7 deg
Workpiece material:	β titanium alloy (Ti-22V-4Al)
Cutting fluid:	Water-immiscible type cutting fluid (Type Y)
Cutting conditions	Cutting speed : V < 1, V = 15, 60, 110 m/min
	Depth of cut: d = 5, 100, 500, 1,000 μm
	Feed rate: f = 2 μm/rev
	Cutting length : L = 0 - 10,000 m

4.3　実験結果および考察

4.3.1　超精密切削加工に及ぼす切削速度の影響と効果

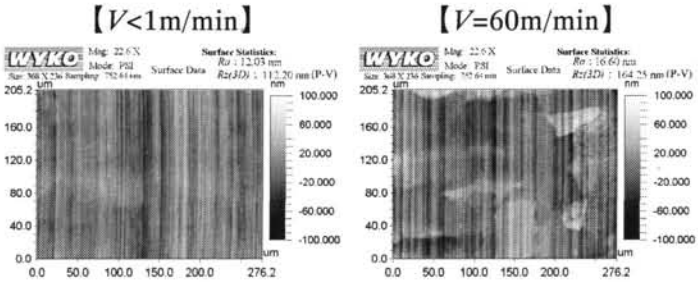
図 4-3 に，コーティングバイトを用いて，極低切削速度 V<1m/min と中切削速度 V=60 m/min でβ型チタン合金を超精密切削加工して得られた仕上面を示す．図 4-3(a)に示すように，極低切削速度 V<1m/min の仕上面では，規則的な切削条痕が観察されるだけである．一方，中切削速度 V=60m/min の場合は，規則的な切削条痕に加えて，一部に深い条痕が観察される．また，粒径 100μm 程度のβ型チタン合金の結晶粒も観察される．



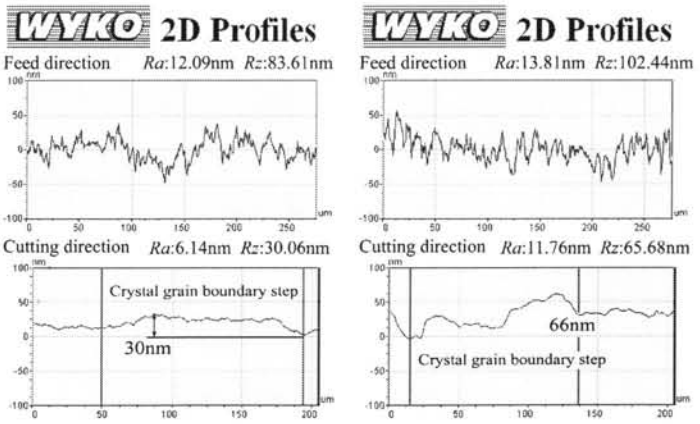
(a) V<1m/min　　(b) V=60m/min

図 4-3　極低切削速度および中切削速度による超精密切削仕上面のの比較

[f=2μm/rev，d=5μm，L=212m]



(a) WYKO 3 次元測定結果



(b) WYKO 2次元測定結果

図 4-4　各切削速度で加工した超精密切削仕上面粗さの WYKO 測定結果

[f=2μm/rev，d=5μm，L=212m]

これらの仕上面を WYKO により測定した結果は，図 4-4 に示される．極低切削速度で加工した超精密切削仕上面は，図 4-4(a)左図に示す WYKO 測定結果より 3 次元仕上面粗さ $Hr_{(3D)}$=112nm(Rz)程度である．一方，深い条痕や粒径 100μm 程度の結晶粒が観察された中切削速度では，仕上面の 3 次元仕上面粗さをみると，図 4-4(a)右図に示すように $Hr_{(3D)}$=164nm(Rz)程度であり，極低切削速度の場合と比較して 50nm(Rz)程度大きくなっているのがわかる．3 次元 WYKO 測定結果を工具送り方向および切削方向について詳細にみてみる．図 4-4(b)右図に示す 2 次元 WYKO 測定像において，中切削速度の仕上面における切削方向の仕上面粗さは，$Hr_{(cut)}$=66nm(Rz)程

度であり，50nm(Rz)を超える粒界段差が確認できる．工具送り方向の仕上面粗さは，前述した粒界段差を含む Hr=117nm(Rz)となり，100nm を上回る仕上面となった．一方，極低切削速度で加工した場合の切削方向の仕上面粗さは，図 4-4(b)左図に示すように $Hr_{(cut)}$=30nm(Rz)程度である．中切削速度の切削方向の仕上面粗さと比較すると，約 35nm(Rz)の粒界段差が減少している．工具送り方向の仕上面粗さは Hr=84nm(Rz)となり，100nm(Rz)よりも良好な，粒界段差が減少した平滑化された仕上面が得られた．

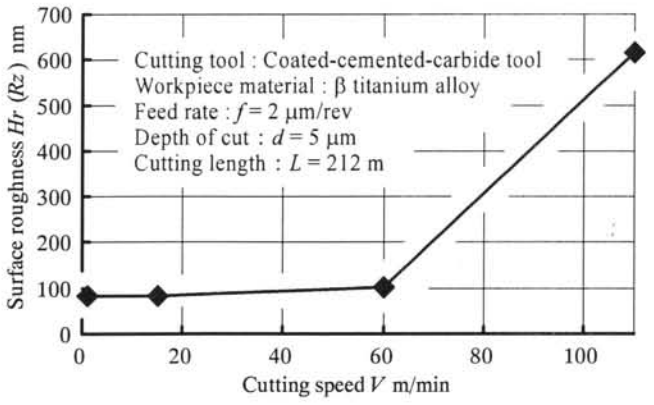
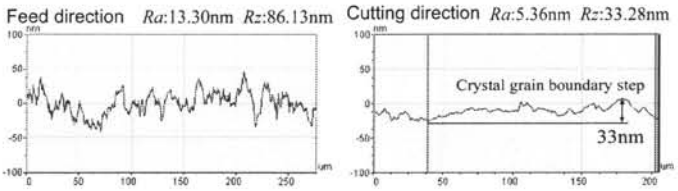


図 4-5　β型チタン合金の超精密切削における切削速度と仕上面粗さとの関係



(a) 工具送り方向　　(b) 切削方向

図 4-6　中切削速度における超精密切削仕上面の WYKO 測定結果
[V=60m/min, f=2μm/rev, d=5μm, L=212m]

図 4-5 に，コーティングバイトを用いてβ型チタン合金を工具切込み量 d=5μm で切削距離 L=212m まで超精密切削した場合の切削速度と得られた仕上面粗さの関係を，また，図 4-6 に低切削速度 V=15m/min で加工した仕上面粗さの測定結果をそれぞれ示す．仕上面粗さ 100nm(Rz)以下の仕上面が得られた極低切削速度 V<1m/min よりも速い低切削速度 V=15m/min の場合，図 4-6(b)に示すように，切削方向に $Hr_{(cut)}$=33nm(Rz)程度の粒界段差が観察される．仕上面粗さは Hr=86nm(Rz)程度であり，図 4-4 左図に示した極低切削速度の場合と，ほぼ同程度の仕上面が得られた．一方，高切削速度 V=110m/min で加工した場合，図 4-5 に示すように，仕上面粗さは Hr=600nm(Rz)程度と非常に悪くなることが確認された．

図 4-7 に，極低切削速度 V<1m/min および中切削速度 V=60m/min で超精密切削した際に生じる主分力および背分力を比較して示す．両切削速度の場合とも，背分力の方が主分力よりも大きい．そして，主分力 Ft と背分力 Fn は，中切削速度 V=60m/min で，Ft=0.8N と Fn=1.0N 程度で，極低切削速度 V<1m/min で，Ft=0.3N と Fn=0.4N 程度である．前述の弾性リングの剛性を考えると，V=60m/min で工具切込み量が約 1μm，V<1m/min で切込み量が約 0.5μm 程度減少していることになるが，極低切削速度で加工した場合の切削抵抗は，中切削速度の切削抵抗よりも明確に小さくなるのがわかる．

本研究のように，大きな刃先丸味をもつ工具による超精密切削加工を行う場合，工具と工作物の接触を，単純に工具を工作物に押込んだ場合の接触で考えると，中切削速度の方が，切削温度が高く，工作物の軟化が考えられるので，押込み抵抗，すなわち，背分力は減少することが考えられる [5]．実験結果は，上述のように，その逆の結果を示していることから，中切削速度の方が，工作物軟化により，切れ刃すくい面や切れ刃側方での工作物の盛り上がりが大きくなった状態，すなわち，工具と工作物の接触面積が大きくなった状態で切りくずを生成するようになるため，切削抵抗が大きくなると考えられる．なお，切削抵抗のうち背分力が減少することが，結晶粒界段差の減少に結びつき，極低切削速度における仕上面粗さ向上が行われていると考えられる．

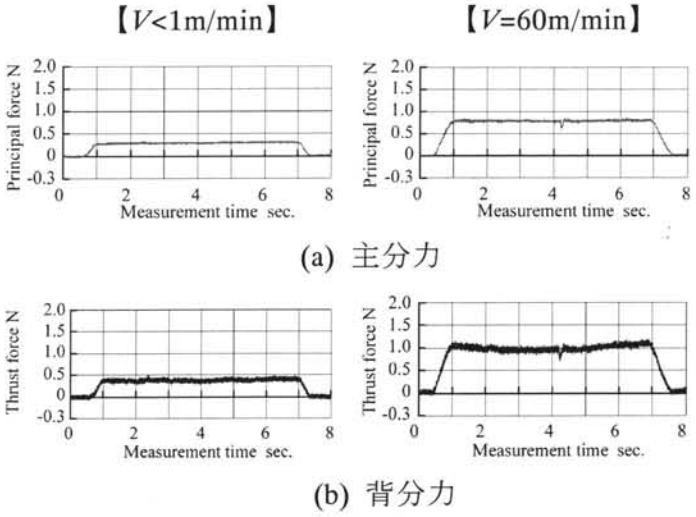
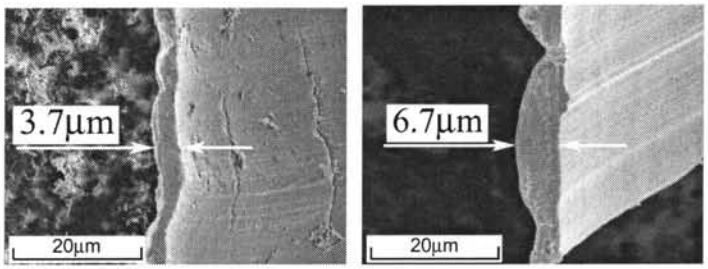


図 4-7　極低切削速度および中切削速度による超精密切削加工時の主分力・背分力の比較
[f=2μm/rev，d=5μm，L=212m]



(a) V<1m/min　　(b) V=60m/min

図 4-8　極低切削速度および中切削速度によるβ型チタン合金超精密切削切りくずの比較
[f=2μm/rev，d=5μm，L=212m]

図 4-8 に，極低切削速度および中切削速度でチタン合金を超精密切削した際に排出された切りくずの SEM 観察例を示す．図より，極低切削速度での切りくず厚さは約 4μm であり，一方，図 4-7 右図に示される中切削速度で加工した場合は約 7μm である．極低切削速度で加工した場合の切りくずの方が 3μm 程度薄くなっている．この結果は，極低切削速度では，切りくずせん断角が大きくなることを意味している [6), 7)]．図 4-7 および図 4-8 の結果をみると極低切削速度にすることで，切削抵抗および切りくず厚さが小さくなり，加工に要するエネルギーが減少していると考えられる．このことは，加工中に発生する熱量の減少にもつながり，最終的に工具摩耗が減少して，良好な仕上面が得られたと推測される．

4.3.2　極低切削速度における超精密切削仕上面粗さと工具摩耗の検討

図 4-9 に，コーティングバイトを用いて，極低切削速度 V<1m/min, 工具切込み量 d=5μm, 工作物一回転あたりの工具送り量 f=2μm/rev で，β型チタン合金の超精密切削加工を行った場合の切削距離 L=212m，2,000m，10,000m の仕上面とその仕上面粗さを示す．なお，2 次元仕上面粗さは，工具送り方向と切削方向の仕上面粗さの両方について示す．

まず，各切削過程における工作物表面の観察結果を見ると，いずれの場合も加工により刻まれた切削条痕が明確に見られる．図 4-9(a) 上左図に示される L=212m の仕上面では，ほぼ一様な切削条痕が刻まれているが，結晶粒界は見出すことが出来ない．これは，切削速度が V=60m/min で他の条件は同じの先の研究 [1]において，切削距離 L=100m で，約 100nm の結晶粒界段差が明確に見出されたのとは大きな差違である．図 4-9(b)(c) に示される L=2,000m および 10,000m の仕上面では，不規則な間隔で一部に深い条痕が観察される．また，L=212m の仕上面ではほとんど見られないβ型チタン合金の結晶粒界が，L=2,000m ではかすかに見られ

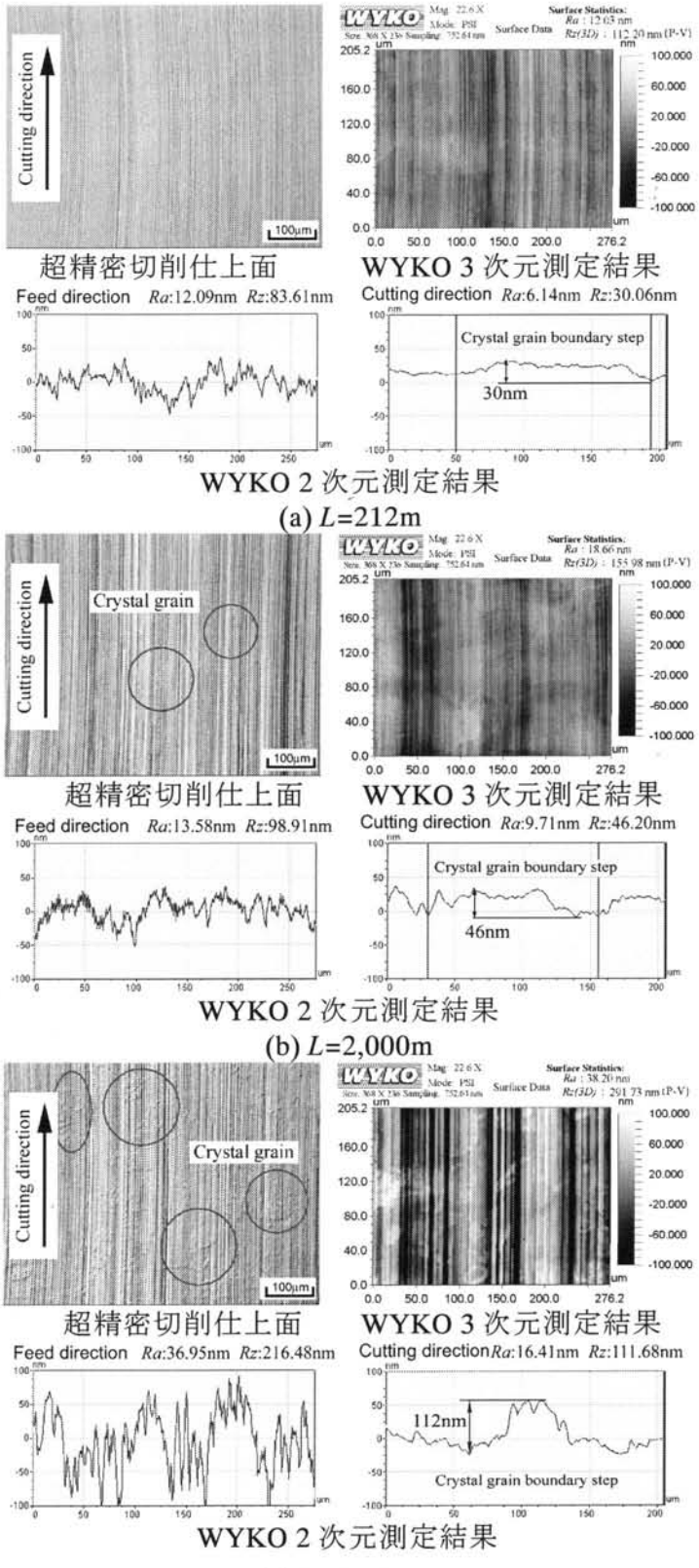


図 4-9　切削過程における超精密切削仕上面の変化
[V<1m/min, f=2μm/rev, d=5μm]

るようになり，L=10,000m の仕上面では明瞭に観察できるようになる．

次に，それらの仕上面の 3 次元仕上面粗さをみると，L=212m の仕上面では $Hr_{(3D)}$=112nm(Rz) 程度，L=2,000m で $Hr_{(3D)}$=156nm(Rz) 程度，L=10,000m で $Hr_{(3D)}$=292nm(Rz)程度となり，切削距離 L=10,000m では非常に大きくなっているのがわかる．この仕上面粗さの増加を，2 次元工具送り方向仕上面粗さの観点でみると，L=212m では Hr=84nm(Rz)程度，L=2,000m で Hr=99nm(Rz)程度，L=10,000m で Hr=216nm(Rz)程度となっており，切削距離 L=10,000m では，格段に大きくなっているのがわかる．WYKO による 2 次元粗さ曲線を見ても，短い周期で大きな振幅が見られることから，工具摩耗による転写工具形状変化やチタン合金の凝着等が影響したものと推定している．また，この増大には，工具送りに関係する短周期の波に加えて，結晶粒界段差と思われる長波長の振幅の増加も関係している．さらに，2 次元切削方向仕上面粗さの観点でみると，L=212m では粒界段差 $Hr_{(cut)}$=30nm(Rz)程度，L=2,000m で $Hr_{(cut)}$=46nm(Rz)程度であるのに対して，L=10,000m では $Hr_{(cut)}$=112nm(Rz)程度となり，粒界段差が 100nm を超える仕上面になっている．この L=10,000m における約 100nm の粒界段差は，第 2 章で行った切削速度が V=60m/min の切削距離 L=100m で見られた粒界段差とほぼ同じである．仕上面粗さは，工具送りによる転写面粗さ（工具刃先半径方向粗さを含む），粒界段差，スクラッチおよび工作機械精度や振動や・温度環境によって構成されると考えられるが，β型チタン合金では，上述の結果から，粒界段差の影響は相当大きいと言える．

図 4-10 に，極低切削速度 V<1m/min でチタン合金を超精密切削した場合の切削距離と仕上面粗さの関係を示す．なお，参考のため，中切削速度 V=60m/min で加工した場合の結果も示した．図より，中切削速度で加工した場合は，切削距離の増加とともに仕上面粗さは急激に悪化し，切削距離 L=2,000m において仕上面粗さ Hr=300nm (Rz) 程度に達する．また，L=3,000m では，Hr=800nm(Rz)程度の非常に粗い仕上面となっているのがわかる．それに対して，極低切削速度の場合には，仕上面粗さは切削距離とともに徐々に，ほぼ一定の悪化速度で悪くなる．切削距離 L=4,000m までは，仕上面粗さ Hr=100nm (Rz)

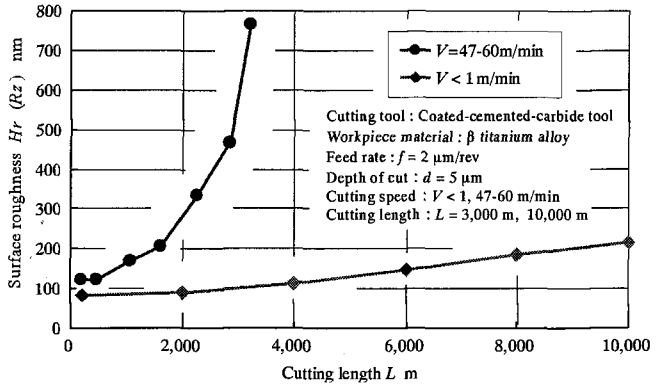
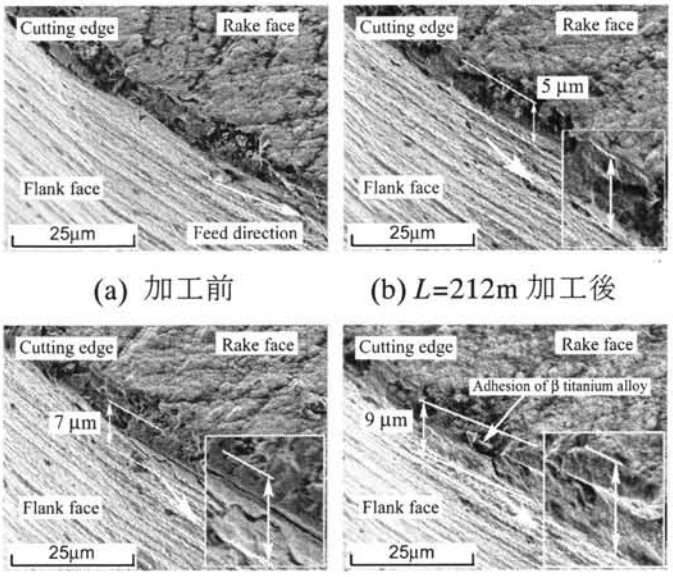


図 4-10　極低切削速度および中切削速度による超精密切削における切削距離と仕上面粗さの関係

程度で，L=10,000m においても Hr=200nm(Rz)を少し越えた程度に留まる．

図 4-11 に，極低切削速度 V<1m/min で切削距離 L=212m, 4,000m および 10,000m を切削した後のコーティングバイト逃げ面摩耗状態を示す．切削距離 L=212m では，図 4-11(b)に示すように，5μm 程度の最大逃げ面摩耗幅が生じている．仕上面粗さが Hr=100nm(Rz)を超えた切削距離 L=4,000m においては，工具逃げ面の摩耗に加え，すくい面にも摩耗が及んでいるのが観察される．刃先稜から逃げ面摩耗の最下部を摩耗幅として測定すると 7μm 程度である．切削距離 L=10,000m では，逃げ面摩耗幅は 9μm 程度となる．また，工具切れ刃先端のコーティング層部分は,摩耗により変化し，コーティング層が連続した状態ではなく，チタン合金の凝着等がみられる不連続な状態になっているのが観察される．



(a) 加工前　(b) L=212m 加工後

(c) L=4,000m 加工後　(d) L=10,000m 加工後

図 4-11　切削過程における工具摩耗の変化
[V<1m/min, f=2μm/rev, d=5μm]

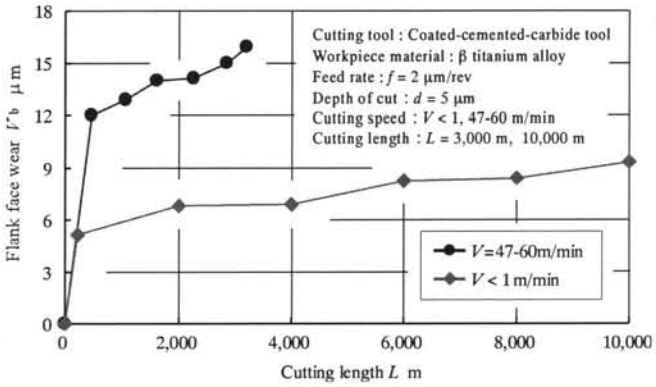


図 4-12　各切削速度による超精密切削における切削距離と工具逃げ面摩耗の関係

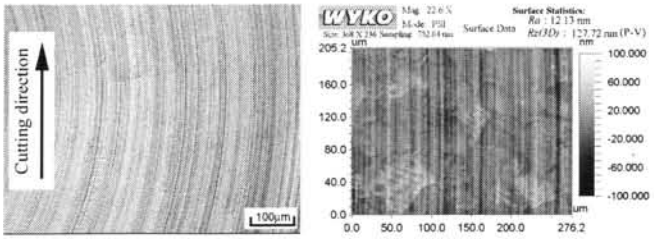
図 4-12 に，極低切削速度 V<1m/min と中切削速度 V=60m/min で加工した場合に生じた工具逃げ面最大摩耗幅の関係を示す．いずれの切削速度の場合とも，初期に大きな摩耗があり，その後，徐々に増加する傾向を示す．逃げ面摩耗幅 Vb の変化については，まず，V<1m/min の場合には，初期摩耗が大きく，切削距離 L=212m で Vb=5μm 程度になった後，L=4,000m で 7μm 程度，切削距離 L=10,000m で Vb=9μm 程度となる．初期摩耗を除けば，切削距離 1m 当たりの逃げ面摩耗幅増加量（以下，逃げ面摩耗増加率と記す）は，約 Kb=4μm/10000m=4×10^{-4}(μm/m)であり，比較的小さな増加率である．一方，中切削速度 V=60m/min の場合には，初期工具摩耗が V<1m/min の場合に比

較して大きく，切削距離 L=212m で Vb=12μm 程度になる．その後の逃げ面増加率は約 $Kb=1\times10^{-3}$(μm/m)で，V<1m/min の場合の約 2.5 倍で増加し，L=3,000m で 16μm 程度である．

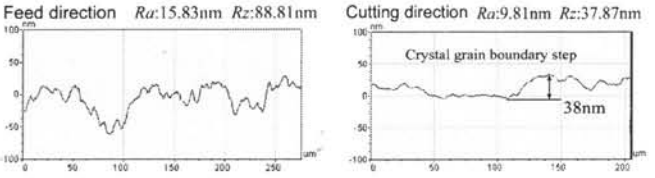
超精密切削加工における工具寿命基準の一つは，仕上面粗さ基準寿命$(Hr)_{life}$ であると考えられる．仕上面粗さ基準寿命$(Hr)_{life}$ を仕上面粗さが Hr=200nm(Rz)を越えた場合とし，それに対応する工具摩耗を工具摩耗寿命$(Vb)_{life}$，切削距離を工具寿命切削距離$(L)_{life}$ とすると，V<1m/min では，切削距離$(L)_{life}$=10,000m で，初期工具摩耗を含んで，$(Vb)_{life}$=9μm 程度となる．一方，中切削速度 V=60m/min の場合には，$(L)_{life}$=1,800m の $(Vb)_{life}$=14μm 程度が工具寿命である．仕上面粗さ基準寿命をさらに厳しくし，$(Hr)_{life}$= 100nm(Rz)とすると，V<1m/min の場合で，$(L)_{life}$=4,000m，$(Vb)_{life}$=7μm となる．これに対して，V=60m/min の場合には，$(L)_{life}$=200m，$(Vb)_{life}$=10μm で，工具寿命までの切削距離が極端に短くなり，実用に供するのが難しくなる．いずれにしても，仕上面粗さ基準工具摩耗寿命$(Vb)_{life}$ は，通常の旋削加工における$(Vb)_{life}$=200μm 以上に比較して非常に小さい．このように，切削速度 V=60m/min の場合で，特に工具摩耗寿命$(Vb)_{life}$ が小さくなるのは，摩耗による逃げ面粗さの増大や逃げ面への切りくずの凝着によって生じる仕上面粗さの増大が，粒界段差の増大に比較して格段に大きくなるためと考えられる．

4.3.3 極低切削速度における工具切込み量が超精密切削加工に及ぼす影響

図 4-13 に，コーティングバイトを用いて，極低切削速度 V<1m/min，工具切込み量 d=100μm で，切削距離 L=212m を正面旋削して得られた仕上面および WYKO 測定結果を示す．工具切込み量 d=100μm は，これまでの検討で行ってきた工具切込み量 d=5μm)の 20 倍の高切込み加工である．図からわかるように仕上面には，切削条痕が確認されるが結晶粒界は，かすかに観察される程度である．図 4-13(b)に示される WYKO 測定結果より，3 次元仕上面粗さは，$Hr_{(3D)}$=129nm(Rz)程度である．2 次元仕上面粗さをみると，図 4-13(c)からわかるように，上述の工具切込み量 d=5μm の場合と同程度の約 Hr=89nm(Rz)である．また，粒界段差も約 $Hr_{(cut)}$=38nm(Rz)と小さくなっており，良い仕上面が得られている．



(a)超精密切削仕上面　(b)WYKO 3 次元測定結果



(c)WYKO 2次元測定結果

図 4-13　工具切込み量 d=100μm で加工した超精密切削仕上面

[V<1m/min, f=2μm/rev, d=5μm, L=212m]

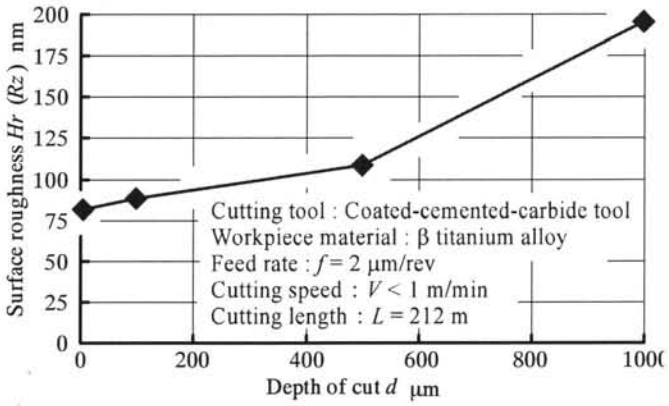


図 4-14　極低切削速度でβ型チタン合金を超精密切削した場合の工具切込み量と仕上面粗さの関係

図 4-14 に，極低切削速度 V<1 m/min で超精密切削した場合の工具切込み量と得られた仕上面粗さの関係を示す．超精密切削仕上面粗さの増加は，切込みが増加すると，工具切込み量 d=500μm まで，ほぼ比例的に増加し，d=5μm で約 Hr=80nm(Rz)であったのが，d=500μm では約 Hr=110nm(Rz)に達する．それ以上になると増加率が増え，d=1,000μm では，Hr=200nm(Rz)となる．これに対して，仕上面を構成する粒界段差は，d=1,000μm まで，同じ増加率でほぼ比例的に増加し，d=5μm で約 30nm であったのが，d=500μm では約 80nm，d=1,000μm では約 100nm となる．d=500μm までの結晶粒界段差の増加率は，仕上面粗さの増加率を上回り，仕上面粗さと結晶粒界段差の差が減少する傾向にもあ

る. これは, 単純に考えると, 環境による粗さへの影響は同じと考えられるので, 工具転写面粗さが減少する傾向とも言える [8]. これは, 工具切込みを大きくすると, 大きな転写力により, 滑らかな工具表面のより良好な転写が行われるためと推察している. 工具切込み量を大きくすることによる結晶粒界段差の増加は, 切削抵抗の増大により, 各結晶粒の弾性回復量の差が増加するためであると考えられる.

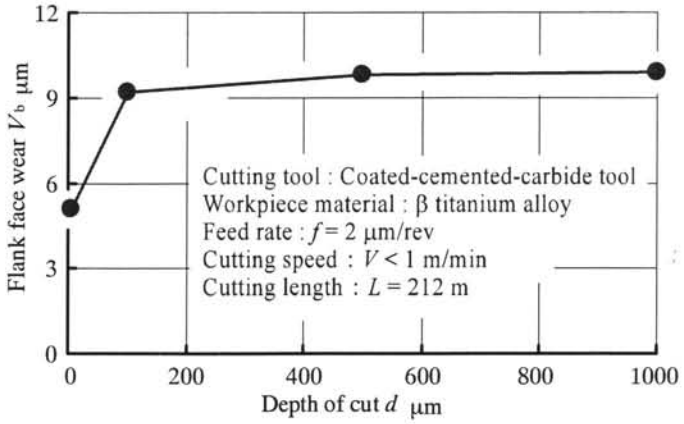


図 4-15　極低切削速度でβ型チタン合金を超精密切削した場合の工具切込み量と工具逃げ面摩耗幅の関係

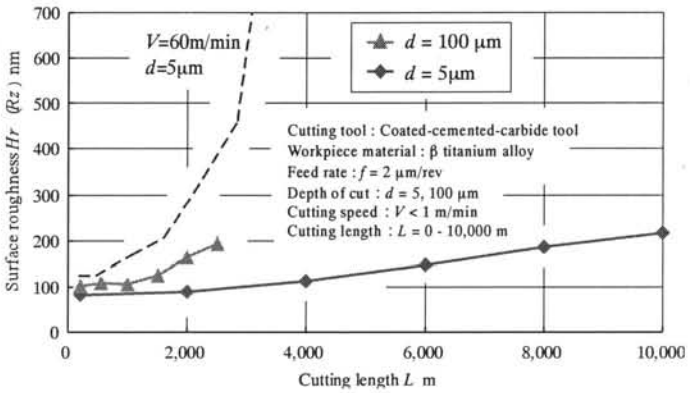


図 4-16　工具切込み量 d=5μm および 100μm でβ型チタン合金を超精密切削した場合の切削距離と仕上面粗さの関係

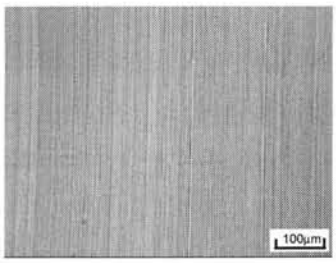
図 4-15 に, 極低切削速度 V<1m/min における工具切込み量と切削距離 L=212m での逃げ面最大摩耗幅の関係を示す. なお, 本測定における逃げ面摩耗幅は, 仕上面を最終的に形成する工具先端部分で行った. 図より, 工具切込み量を d=5μm から 100μm まで大きくすると, 逃げ面最大摩耗幅は 5μm 程度から 9μm 程度まで大きくなる. さらに, 工具切込み量を d=500μm, 1,000μm と大きくしても, 工具逃げ面最大摩耗幅は増加せず, ほぼ同程度であることがわかる. 以上のように, 極低切削速度では, 工具切込み量 1,000μm と非常に大きくしても, 切削初期の段階ではあるが, 工具摩耗は比較的小さい. また, 仕上面粗さも工具切込み量 500μm で 100nm(Rz)程度, 1,000μm で 200nm(Rz)程度が得られる. このことから, 大きな工具切込み量まで超精密切削加工が可能な極低切削速度加工は, 曲面加工のように, 工作物の取代が場所によって大きく変化するような作業を工具交換無しで行い得ることが考えられる [6), 8)]. また, 極低速切削の場合, 比較的短い切削距離までは, 工具切込み量を大きくしても工具逃げ面摩耗は大きくならない. 工作物形状に対して, 低切削速度を考慮した超精密切削加工条件を選択することが重要である

と思われる[8), 9)].

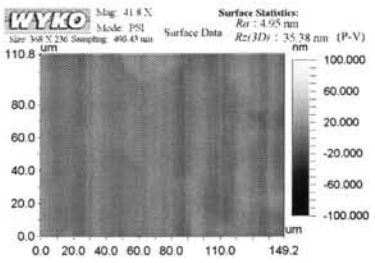
図 4-16 に，極低切削速度 V<1m/min で，工具切込み量 d=100μm で超精密切削する場合の切削過程における仕上面粗さの変化を，図 4-10 で示した工具切込み量 d=5μm の場合と比較して示す．図より，d=100μm の場合の仕上面粗さは，切削初期では，d=5μm の場合と大きな差はない．しかし，切削過程が進むと，仕上面粗さは急激に増加する．これは，図 4-12 に示した V=60m/min で，d=5μm の場合のように，工具摩耗により，切れ刃先端半径粗さが大きく増加するためと考えられる．d=1,000μm の場合には，図 4-14 に示したように，L=212m で，すでに，工具摩耗による仕上面粗さの増加が大きくなるような兆候が見られていることから，仕上面粗さの急激な増加は，さらに短い切削距離から始まることが考えられる．このようなことを考えると，V<1m/min で，工具切込み量を大きくしても，切削初期には仕上面粗さに大きな差違は生じない．しかし，工具切込みが大きいと，工具摩耗速度が大きくなるため，短い切削距離で工具先端丸味半径おける粗さが大きくなったり，工具逃げ面に凝着が生成したりし，その影響で転写面粗さが大きくなる．したがって，仕上面粗さ基準の工具寿命は，工具切込みを大きくすると短くなると言える．

ただし，実用的な意味では，工具切込み量を大きくすると，最終的な製品となる段階での除去速度が大きくなるので，仕上面粗さ基準の工具寿命と工作物の取り代を考慮して，工具切込みを選択することが重要であると言える．

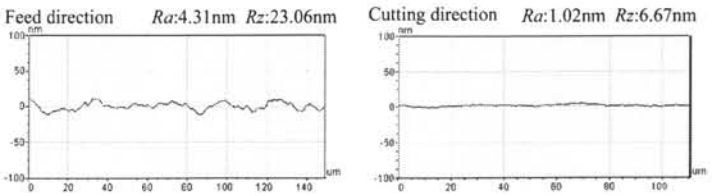
図 4-17 にダイヤモンドバイトを用いて，極低切削速度で，かつ工具切込み量を 1μm と小さく設定して，β型チタン合金を超精密切削して得られた仕上面を示す．仕上面をみると，通常の切削速度で見られる結晶粒界が観察することができないのがわかる．WYKO による測定結果より，3 次元仕上面粗さ $Hr_{(3D)}$=35 nm(Rz)程度である．切削方向の仕上面粗さは，図 4-17(c) 左図に示されるように，$Hr_{(cut)}$=7nm(Rz)であり，100nm (Rz)を越える粒界段差[1)]が，ほとんどなくなっている．その結果，仕上面粗さは Hr=23nm



(a)超精密切削仕上面



(b)WYKO 3 次元測定結果



(c)WYKO 2 次元測定結果

図 4-17　極低切削速度においてダイヤモンドバイトで加工したβ型チタン合金超精密切削仕上面
[V<1m/min，f=2μm/rev，d=1μm，L=212m]

(*Rz*)程度となり，非常に平滑度の高い仕上面が得られた．この仕上面は切削初期過程であり，粒界段差が仕上面粗さに大きく影響すると考えられる．したがって，非常に鋭利なダイヤモンドバイトを用いて粒界段差を大きく減少させることで，比較的広い領域において，50nm(*Rz*)よりも良好な仕上面を得ることができると考えられる．

4.4　小　括

本章では，コーティングバイトを用いたチタン合金の超精密切削加工において，V<1m/min と非常に小さく設定した極低切削速度が，超精密切削仕上面に及ぼす影響を実験的に検討した．他の切削速度との比較検討を行い，より実用的な影響を確認することができた．

以下に得られた結果を示す．

(1)β型チタン合金の超精密切削仕上面粗さは，切削初期過程では結晶粒界段差が仕上面粗さに大きく影響し，その後の過程では，工具摩耗した刃先による転写面粗さが仕上面粗さを大きくしている．極低切削速度で超精密切削した場合，切削初期過程においては，結晶粒界段差が減少して2次元仕上面粗さ Hr=84nm(Rz)程度の仕上面が得られた．

(2)極低切削速度 V<1m/min で超精密切削すると，切削初期過程が非常に長い．加えて，切削による仕上面粗さの悪化も徐々であり，仕上面粗さ Hr=100nm(Rz)は，切削距離 L=4,000m 程度まで可能である．また，Hr=200nm(Rz)となるのは切削距離 L=10,000m 程度であり，V=60m/min の場合における切削距離の6倍以上の長さである．

(3)極低切削速度では，加工中に工具刃先に生じる切削抵抗が小さくなり，加工中の切りくず排出がスムーズに行われて，切りくず厚さは半分程度まで薄くなる．工具切込み量を d=500μm と非常に大きくしても，切りくずは薄くなる傾向があり，仕上面粗さ Hr=100nm(Rz)程度を得ることができる．

(4)工具逃げ面摩耗幅は，低切削速度 V=15m/min では比較的小さく，高切削速度 V=110m/min では非常に大きくなる．また，切削距離による工具逃げ面摩耗幅は，極低切削速度では緩やかに増加するが，切削速度が速くなると急激に増加する．

(6)工具切込み量 d=100μm の場合の仕上面粗さは，切削初期では，d=5μm の場合と大きな差はない．切削距離が長くなると仕上面粗さは悪化するが，切削距離 L=2,500m 付近で仕上面粗さ Hr=200nm(Rz)に達する．これは，従来の仕上面粗さと同程度である．したがって，極低切削速度にしても中切削以上の切削速度では，工具切込み量を大きく設定して加工することが困難であるため，加工後の総除去量を考えれば20倍以上の高能率加工が可能になったといえる．

【参考文献】

1) 安井平司，篠﨑烈：コーティングバイトによるβ型チタン合金の超精密切削に及ぼす低切削速度の効果，精密工学会誌，(2007)，投稿中
2) 安井平司，篠﨑烈：コーティングバイトによるチタン合金の超精密切削―工具寿命に及ぼす低切削速度の効果―，2007 年度 精密工学会春季大会学術講演会講演論文集，(2007)，pp.69
3) 坂本重彦，篠﨑烈，安井平司：チタン金属の超精密切削仕上面に及ぼす成形コーティング工具の効果，2004 年度 精密工学会春季大会学術講演会講演論文集，(2004)，pp. 931
4) 安井平司，古野達也：超精密切削抵抗測定技術の開発，2005 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集，(2005)，pp. 1145
5) 安井平司，篠﨑烈，葭原俊一：コーティング超硬バイトによるチタン合金の超精密切削抵抗の検討，2006 年度 精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集，(2006)，pp. 239
6) Heiji Yasui, Akira Shinozaki : An Investigation on Chip Formation in Ultra-precision Cutting of Titanium Alloy with Coated-Cemented-Carbide Tool at Low Cutting Speed, Proceeding of 7th euspen international conference 2007 –Bremen-, (2007), Vol. 2, pp. 201
7) 社本英二，森本祥之，森脇俊道：楕円振動切削加工法（第 1 報）―加工原理と基本特性―，精密工学会誌，(1996)，Vol. 62，No. 8，pp. 1127
8) Heiji Yasui, Akira Shinozaki, Akira Toyama, Shigehiko Sakamoto and Yusuke Kajiwara : Effect of Low Cutting Speed on Ultra-Precision Cutting of Titanium Alloy with Coated-Cemented-Carbide Tool, Proceeding of American Society of Precision Engineering 2006, (2006), Vol. 41, pp. 563
9) 安井平司，篠﨑烈：チタン合金の超精密切削に及ぼす低切削速度の効果，2006 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集，(2006)，pp. 237

第5章　ダイヤモンドバイトによる低切込み超精密切削加工の検討

5.1　緒　言

単結晶ダイヤモンドバイトを用いた超精密切削加工は，アルミニウムや無酸素銅などの軟質金属を対象として発展してきた．ダイヤモンドバイトを用いた各種材料に対する超精密切削加工の検討は，比較的多く行われている[1)-5)]．しかしながら，チタン金属の超精密切削においては，第2章で検討したように比較的短い切削距離で大きな工具摩耗が生じ，仕上面粗さが 200nm(*Rz*)を越える仕上面となることが確認された．目標とする仕上面粗さ 100nm(*Rz*)以下の仕上面を得るためには，工具摩耗を減少させ，整った刃先形状を仕上面に転写させることが必要となる．

高価な単結晶ダイヤモンドバイトは組織の結合力が強く，それに加えて非常に鋭利にされた工具刃先稜，高精度な刃先形状を有する．一方では，800℃を越える高温下において，ダイヤモンド組織から炭素標準組織へと変化し[6)]，脆化して大きく摩耗してしまうことが，難削材の超精密切削加工に適用が難しい要因として挙げられる．そこで，工具刃先および加工点を液体窒素で冷却して-100℃以下にすることにより，ダイヤモンドバイトの脆化を抑制し，鉄系材料において切削距離 1,000m 付近まで *Hr*=100nm(*Rz*)程度の仕上面が得られるという報告がなされている[7)]．また，工具刃先を振動させて，刃先に生じる切削熱の上昇を防止し，切りくず排出を良くして仕上面性状を向上させる試みも多く報告されている[8)-10)]．しかし，発生熱を小さくして，工具摩耗を減少させることが目的であるが，それほど大きな効果は得られていない．

このようなことから，第3章では，超精密切削仕上面に及ぼす工具切込み量の影響を検討した．特に粒径 100μm 程度，粒界段差 100nm 程度の結晶粒を有するβ型チタン合金においては，工具切込み量を *d*=2μm 程度と小さくすることで仕上面の粒界段差が大きく減少し，得られる仕上面粗さは 3 次元仕上面粗さで $Hr_{(3D)}$=100nm(*Rz*)よりも小さくなった．しかし，得られた仕上面粗さは，軟質金属の超精密切削加工の場合に比較すれば粗く，さらにより高平滑な仕上面を得るためには更なる加工法を検討しなければならない．また，100nm(*Rz*)以下の仕上面を得るためには，工具送り量を 2μm/rev 以上にすることが出来ず，高能率化が課題であった．

本章では，従来加工し得なかったダイヤモンドバイトによるチタン金属の超精密切削加工を検討した．これまでの加工方法では，短い切削距離における工具刃先摩耗が大きいために，仕上面粗さ *Hr*=100nm(*Rz*)程度の仕上面でさえ得ることが困難であった．そこで，より発生熱が低く，摩耗が小さく抑制されると考えられる工具切込み量 *d*=1μm の低切込み量にて加工を行い，工具切込み量が仕上面粗さおよび工具摩耗に及ぼす影響を実験的に検討した．

5.2　実験装置および加工条件

本章では，単結晶ダイヤモンドバイトを用いたチタン金属の超精密切削加工について検討した．工作機械には，超精密旋盤（東芝機械 ULC-100A）を使用して超精密正面旋削加工で行った．超精密旋盤に取り付けた工作物および切削工具などの実験外観を**図 5-1** に示す．**表 5-1** に超精密切削加工条件を示す．工作物は，一辺 16mm，厚さ t=10mm の直方体のβ型チタン合金を用いた．工作物を直径 100mm の円板の中心から約 20mm の位置に貼り付け，その円板を真空チャックで固定した．加工に用いた工具は，第 2 章で検討を行い，仕上面粗さ Hr=200nm(Rz) 程度の仕上面となった単結晶ダイヤモンドバイトである．切削油剤は不水溶性切削油剤を使用し，工具送り方向から圧縮空気と共に切削点近傍にミスト供給した．また，加工によって生じる切削抵抗を，**図 5-2** に示す六角形型弾性リング[11]を用いて測定した．加工中に生じる主分力および背分力の測定結果は，加工の 10 秒間を測定し，その単位を N として表している．

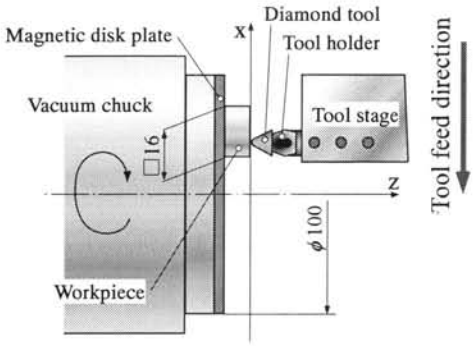


図 5-1　超精密切削加工の外観

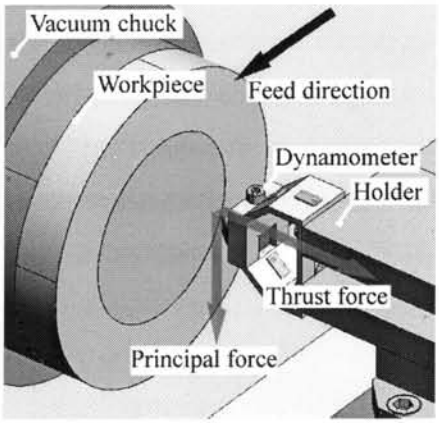


図 5-2　切削分力測定用六角形型弾性リング動力計

主な切削条件は，主軸回転数 500rpm，工具切込み量は微少切込みの d=1μm，主軸 1 回転あたりの工具送り量は，f=2μm/rev から 50μm/rev まで変えて検討を行った．なお，本検討では，工具送り量 f=10μm/rev および 50μm/rev について，切削距離 L=21,000m まで寿命に関する検討実験を行った．

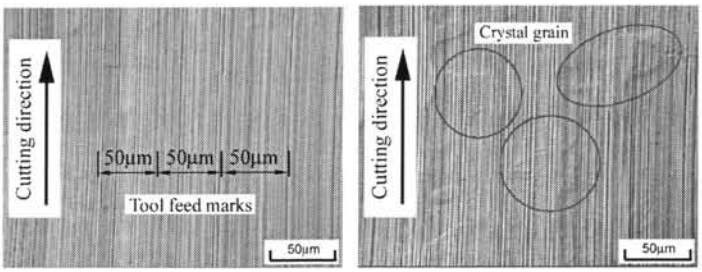
表 5-1　超精密切削加工実験条件

Machine tool: Ultra-precision Lathe ULC-100A, Toshiba Machine CO., LTD.	
Cutting tool:	Single crystal diamond tool Nose radius: 4 mm Rake angle: 0 deg Relief angle: 7 deg
Workpiece material:	β titanium alloy (Ti-22V-4Al)
Cutting fluid:	Water-immiscible type cutting fluid (Type Y)
Cutting conditions	Cutting speed : V = 47 - 60 m/min Depth of cut: d = 1 μm Feed rate: f = 2 - 50 μm/rev Cutting length : L = 0 - 21,000 m

5.3　実験結果および考察

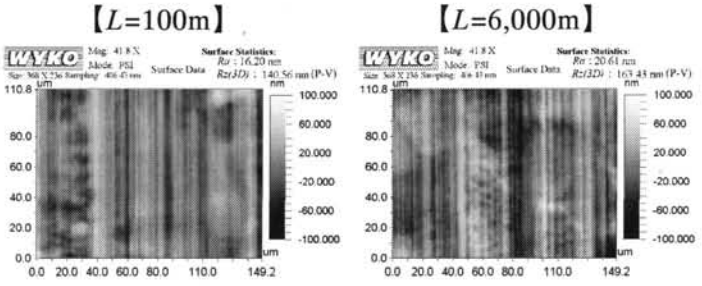
5.3.1　低切込み超精密切削加工によるダイヤモンドバイト工具寿命の検討

図 5-3 に，単結晶ダイヤモンドバイトを用い，工具切込み量 d=1μm，工作物一回転あたりの工具送り量 f=50μm/rev で，β型チタン合金の超精密切削加工を行った場合の仕上面の微分干渉顕微鏡写真を示す．なお，切削距離 L=100m と 6,000m で比較している．まず，図 5-3(a)の仕上面を見ると，切削距離 L=100m と非常に短い場合には，図に示すように工具送り量 50μm 間隔で刻まれた条痕とそれよりも狭い間隔で刻まれた条痕が確認される．そして，その仕上面には，β型チタン合金をコーティングバイトで超精密切削した場合に見られる結晶粒 [12]はほとんど観察されない．一方，図 5-3(b)に示す L=6,000m と切削距離が長い場合の仕上面をみると，L=100m の場合と同様に，切削条痕が観察される．しかし，粒径 100μm 程度の結晶粒も明確に観察され，L=100m とは大きく異なる．

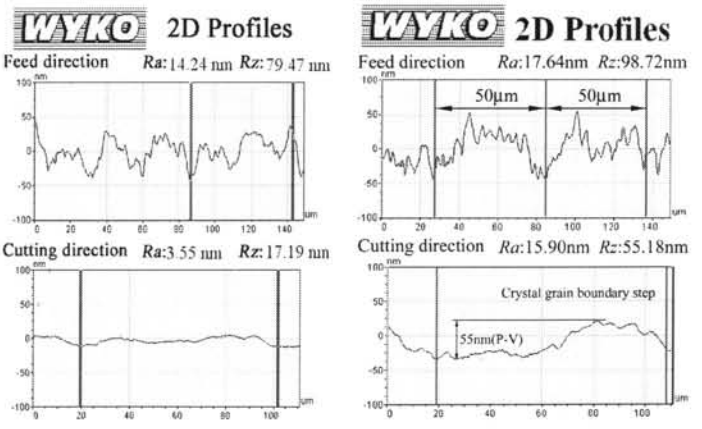


(a) L=100m　　(b) L=6,000m

図 5-3　ダイヤモンドバイトによる L=100m および 6,000m の超精密切削仕上面の比較
[V=60m/min，f=50μm/rev，d=1μm]



(a) WYKO 3 次元測定結果



(b) WYKO 2次元測定結果

図 5-4　ダイヤモンドバイトによる L=100m および 6,000m の超精密切削仕上面粗さの WYKO 測定結果比較
[V=60m/min，f=50μm/rev，d=1μm]

図 5-4 に，これらの仕上面を WYKO によって測定した結果を示す．なお，図 5-4(b)上図と下図は，それぞれ工具送り方向と切削方向の仕上面粗さを示す．仕上面粗さを，図 5-4(a)に示す 3 次元仕上面粗さで見ると，切削距離 L=100m で

$Hr_{(3D)}$=141nm(*Rz*)程度，*L*=6,000m では $Hr_{(3D)}$=163nm(*Rz*)程度である．いずれの切削距離においても3次元仕上面粗さ $Hr_{(3D)}$= 100nm(*Rz*)を越えているが，比較的，高平滑面であると言える．ここで，*L*=100m よりも *L*=6,000m の方が，3次元仕上面粗さが大きくなる原因を検討するために，図 5-4(b)に示す2次元仕上面粗さをみてみる．図 5-4(b)上図の工具送り方向の仕上面粗さは，*L*=100m と *L*=6,000m で，*Hr*=79nm(*Rz*)および94nm(*Rz*)であり，*L*=6,000m の方が 15nm 程度大きくなっている．一方，図 5-4(b)下図からわかるように，切削方向仕上面粗さは，*L*=100m で $Hr_{(cut)}$=19nm(*Rz*)程度であるのに対して，*L*=6,000m では $Hr_{(cut)}$=57nm(*Rz*)程度になる．切削方向仕上面粗さは，*L*=100m，*L*=6,000m のいずれの場合も，工具送り方向仕上面粗さより小さいが，切削距離の増加による粗さの差は 38nm と大きく増加している．このような切削距離による切削方向仕上面粗さの増加には，図 5-3 で見られたような結晶粒界段差の増加に加えて，工具摩耗に伴って工具刃先稜粗さが増加したことも影響していると考えられる．それらの切削方向仕上面粗さへの影響は，前述のように 40nm 程度にも及び，チタン合金の超精密切削加工を行う上で，考慮しなければならない大きな事項と言える．

図 5-5 にダイヤモンドバイトを用いて，β型チタン合金を切削した場合の切削距離と仕上面粗さの関係を示す．なお，参考のために，幾何学的理論粗さの算出式 $Hr_{th}=\{f^2/(8R)\}\times10^{-3}$ (nm) に，工具送り量 *f*=50μm/rev と工具刃先半径 *r*=4mm を代入して求めた理論粗さを破線で示す．図より，切削距離 *L*=6,000m 程度までは仕上面粗さ *Hr*=100nm(*Rz*)以下となっているのがわかる．この仕上面粗さは，算出された理論粗さ Hr_{th}=78 nm(*Rz*)と比較すると，ほぼ同程度である．しかし，*L*=6,000m を越えると，切削距離が長くなるにしたがい，仕上面粗さは大きくなる．上述の粒界段差の増加や工具摩耗に伴った工具刃先稜粗さの増加が関係して，大きくなったと考えられる．ただ，このような増加した仕上面粗さでも，*L*=15,000m までは *Hr*=150nm(*Rz*)以下の仕上面粗さとなる．また，切削距離 *L*=21,000m までは，*Hr*=200nm(*Rz*)程度の仕上面粗さを維持できており，比較的長い切削距離においても，良好な仕上面が得られている．この結果より，

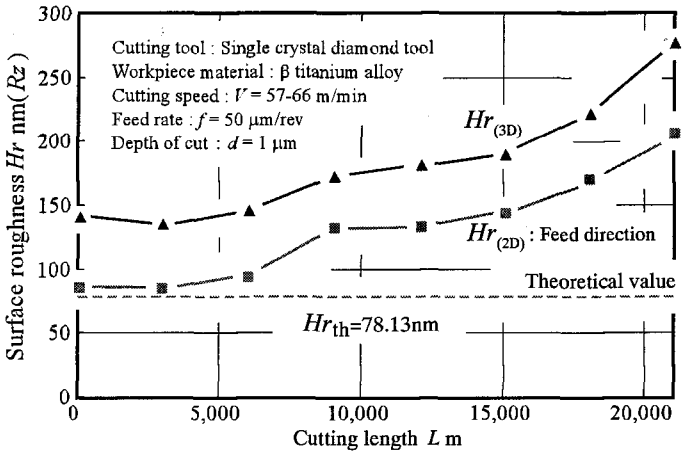
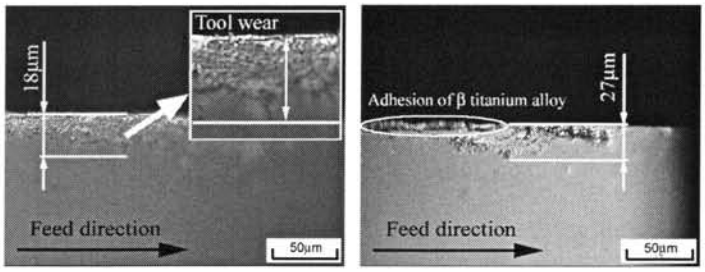


図 5-5　ダイヤモンドバイトによるβ型チタン合金超精密切削における切削距離と仕上面粗さの関係（工具送り量 *f*=50μm/rev の場合）

小さな工具切込み量の設定でダイヤモンドバイトを用いると，比較的長い切削距離まで粒界段差を小さく抑制することができ，良い仕上面粗さを生成し得ると考えられる．



(a) L=100m　　(b) L=6,000m

図 5-6　切削距離の増加によるダイヤモンドバイト刃先摩耗の変化
[V=60m/min, f=50μm/rev, d=1μm]

図 5-6 に，工具送り量 f=50μm/rev で切削距離 L=100m および 6,000m を切削した後のダイヤモンドバイト逃げ面摩耗状態を示す．切削距離 L=100m では，図 5-6(a)に示すように，切削距離が非常に短いにもかかわらず工具逃げ面摩耗幅 V_b=18μm 程度の最大逃げ面摩耗が生じている．一方，切削距離 L=6,000m では摩耗幅が V_b=27 μm 程度に増加し，刃先稜の一部には切削により生じたβ型チタン合金の凝着が観察される．

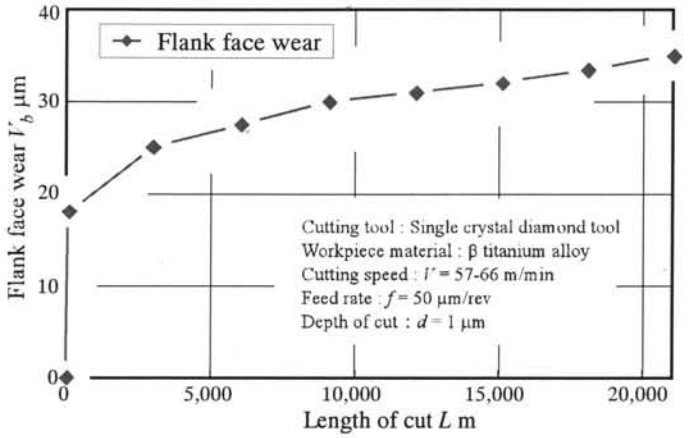
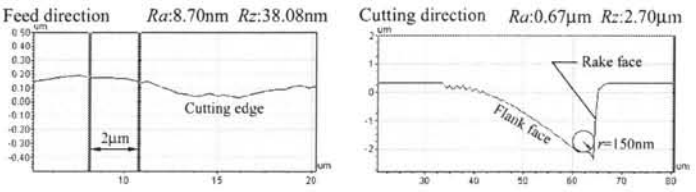


図 5-7　β型チタン合金超精密切削における切削距離とダイヤモンドバイト逃げ面摩耗幅の関係（工具送り量 f=50μm/rev の場合）

図 5-7 に，ダイヤモンドバイトによって超精密切削した切削距離と切削により生じたダイヤモンドバイトの同じ箇所の逃げ面最大摩耗幅 V_b の関係を示す．図より，切削初期の L=100m までに V_b=20μm 程度の急激な摩耗幅の増加が見られる．その後は，徐々に増加し，切削距離 L=21,000m では，摩耗幅は V_b=35μm 程度までしか増加しない．第 2 章で行った，ダイヤモンドバイトによる超精密切削加工の工具切込み量 d=5μm の場合 [12]とは大きく異なり，小さな摩耗幅である．工具切込み量を d=1μm と小さく設定したため，工具刃先温度上昇が軽減され，その結果として，工具摩耗の進行が抑制されたと考えられる．なお，この結果より，工具逃げ面摩耗幅には，工具の初期摩耗が大きな割合を占めると言える．

図 5-8 に，切削距離 L=100m 加工後のダイヤモンドバイト刃先稜を転写させた押込み痕とその形状測定結果を示す．未加工状態のダイヤモンドバイトの刃先稜は，図 2-29 に示したように，非常に鋭利な形状である．しかし，チタン合金を切削することで工



(a) X-X' 方向　　(b) Y-Y' 方向

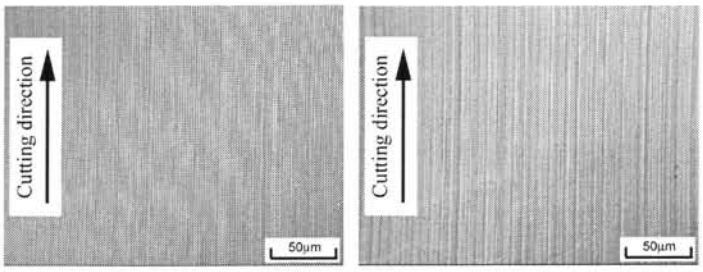
図 5-8　切削距離の増加によるダイヤモンドバイト刃先摩耗の変化

[押込み深さ：5μm，ワーク：OFHC，灯油を使用]

具逃げ面および刃先稜が摩耗し，工具刃先稜は，図 5-8(a)に示すように $Hr_{(tool)}$=38 nm(Rz)程度まで粗くなる．一方，工具刃先丸みは，図 5-8(b)に示すように 150nm 程度まで大きくなっている．しかしながら，図 5-5 において，切削距離 L=21,000m でも仕上面粗さが Hr=200nm(Rz)程度にしかならないことから，工具摩耗は，仕上面粗さの増加に比較的緩やかに影響していることが考えられる．以上のことから，コーティングバイトにおいて，L=2,000m まで維持できた仕上面粗さ Hr=200nm(Rz)を工具寿命の基準とすると，本実験でのダイヤモンドバイトの工具寿命は約 L=20,000m，逃げ面摩耗幅で約 V_b=35μm になり，通常よりも低切込み量の d=1μm では非常に高寿命となると言える．

5.3.2 超精密切削仕上面粗さに及ぼす工具送り量の影響

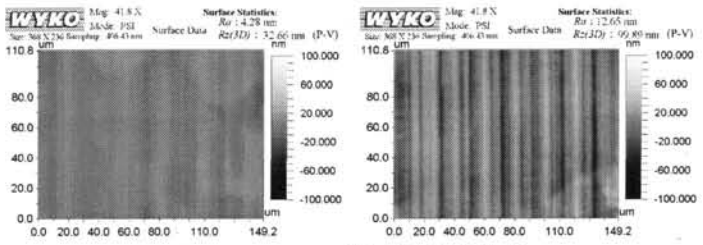
図 5-9 に，工具送り量 f=2μm/rev および 20μm/rev で正面旋削して得られた仕上面の微分干渉顕微鏡写真を示す．工具送り量 f=2μm/rev で切削した仕上面では，図 5-9(a)に示すように，β型チタン合金の結晶粒は，ほとんど観察されない．また，工具送り量を f=20μm/rev まで大きくして切削した仕上面においても結晶粒は確認し難くなっているのがわかる．



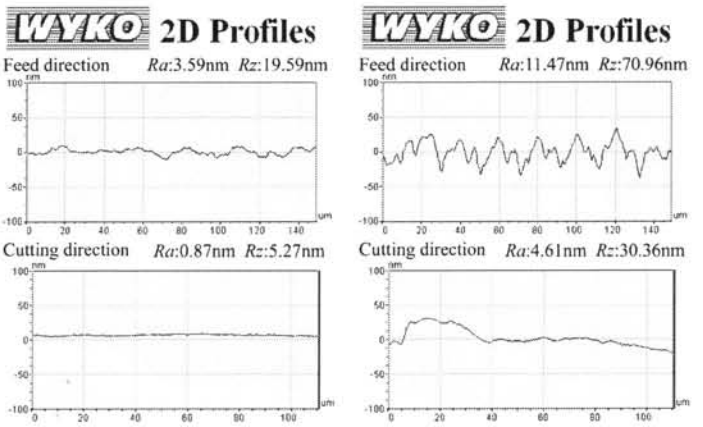
(a) f=2μm/rev　　(b) f=20μm/rev

図 5-9　工具送り量 f=2μm/rev および 20μm/rev で超精密切削して得られた仕上面の比較
[V=60m/min，d=1μm，L=212m]

図 5-10 に，各工具送り量で加工して得られた超精密切削仕上面の粗さを WYKO で測定した結果を示す．工具送り量 f=2μm/rev で切削した場合の仕上面粗さは，図 5-10(a)左図に示すように 3 次元仕上面粗さ $Hr_{(3D)}$=33nm(Rz)程度である．また，工具送り量 f=20μm/rev で切削した仕上面でも，図 5-10(a)右図に示すように 3 次元仕上面粗さ $Hr_{(3D)}$=100nm(Rz)程度であり，比較的良い仕上面が得られた．この仕上面粗さを 2 次元仕上面粗さで，もう少し詳細に検討すると，工具送り方向仕上面粗さは，図 5-10(b)左上図に示すように f=2μm/rev で Hr=20nm(Rz)または，Hra=3.6nm(Ra)の非常に良い面であり，粒界段差は見られない．一方，f=20μm/rev の場合には，図 5-10(b)右上図に見られるように，バイト刃先転写によって形成される 20μm 間隔毎の周期的な約 Hr=71nm(Rz)の粗さがみられる．次いで，切削方向の 2 次元仕上面粗さをみると，f=2μm/rev の場合，



(a) WYKO 3 次元測定結果



(b) WYKO 2次元測定結果

図 5-10　各種工具送り量による超精密切削仕上面の WYKO 測定結果
[V=60m/min，d=1μm，L=212m]

$Hr_{(cut)}$= 5nm(Rz)程度であり，f=20μm/rev の場合は，それよりも粗く $Hr_{(cut)}$=16nm(Rz)となるが，図 5-4(b)右下図で観察されたような結晶粒界段差の影響は，ほとんどみられない．その結果，2 次元仕上面粗さは Hr=71nm(Rz)と小さくなり，工具送り量を f=20μm/rev まで大きくしても Hr=100nm(Rz)以下の仕上面が得られると考えられる．

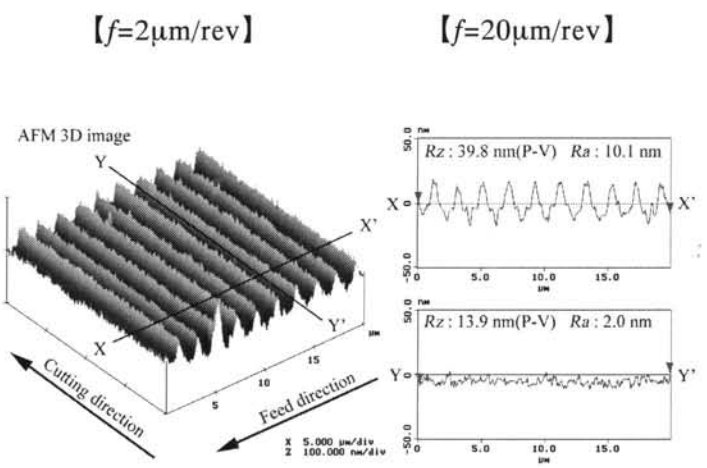


図 5-11　ダイヤモンドバイトを用いて工具送り量 f=2μm/rev で超精密切削して得られた仕上面の AFM 観察結果

[V=60m/min, f=2μm/rev, d=1μm, L=100m]

図 5-11 に，工具送り量 f=2μm/rev で切削して得られた超精密切削仕上面を原子間力顕微鏡（AFM）で観察した結果を示す．これは，図 5-10(b)の WYKO の測定では，横分解能が 0.4μm であり f=2μm/rev の周期では，その仕上面粗さが明確に測定し得ていないことが考えられたために行った検討である．図より，超精密切削仕上面の□20μm×20μm の領域において，工具送り量の 2μm の間隔で切削条痕が規則正しく刻まれているのがわかる．その粗さは，2 次元仕上面粗さ Hr=40nm(Rz)または，Hra=10nm(Ra)である．これは WYKO の 3 次元測定粗さを越える結果となっており，工具送り量が小さな場合には，横分解能が高い測定装置を使う必要があることが確認できた．

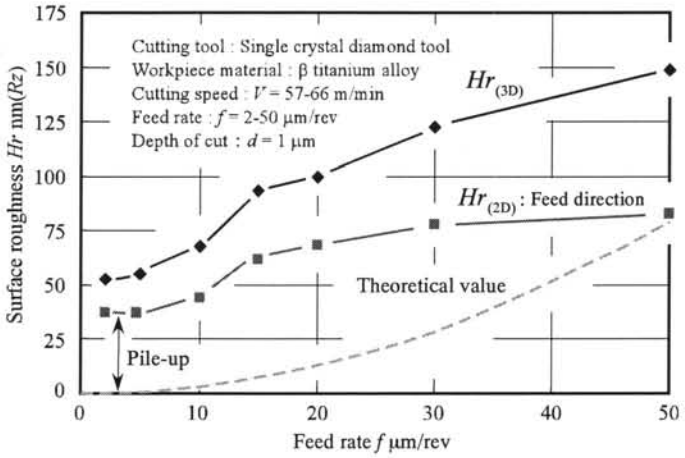
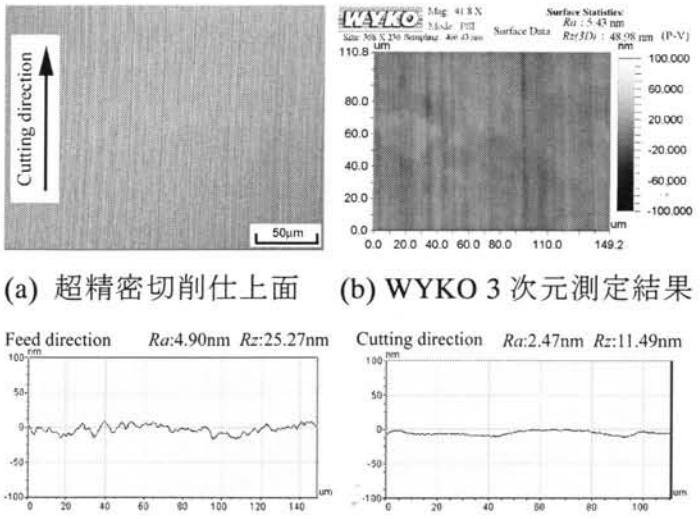


図 5-12　ダイヤモンドバイトによるβ型チタン合金超精密切削における工具送り量と仕上面粗さの関係

図 5-12 に，切削距離 L=100m 以下の非常に短い切削における工具送り量と仕上面粗さの関係を示す．なお，参考のため，幾何学的仕上面粗さ Hr_{th} も示した．また，f=2μm/rev の場合には AFM の平均値で求めた．図よりわかるように，送り量 f=10μm/rev 程度ま

では，送り量を増加すると仕上面粗さは緩やかに増加するが，2 次元仕上面粗さは Hr=50nm(Rz) 以下の非常に高平滑な仕上面が得られる．工具送り量を，さらに増加していくと，それに伴って実験値，理論値が増加するが，実験値の増加率の方が理論値の増加率よりも小さい．工具送り量 f=15μm/rev 以上に送り量を増加しても仕上面粗さは，非常に緩やかにしか増加せず，f=50μm/rev でも，仕上面粗さは Hr=80nm(Rz)を維持する．このような結果，送り量が小さい場合には，理論粗さに比較して，実験値は非常に大きな値となるが，f=50μm/rev では，ほとんど差異がなくなってしまう．超精密切削仕上面粗さには，工具の工作物への転写面粗さ（工具刃先転写や工具送り量転写等），微小痕・スクラッチ，粒界段差，工作機械の振動，周囲温度変化等が影響すると考えられるが [13]，工具送り量を大きくすると，工具送り量転写粗さが仕上面粗さの大部分を占めるようになり，その他の影響が相対的に小さくなるためと考えられる．



(a) 超精密切削仕上面　(b) WYKO 3 次元測定結果

(c) WYKO 2 次元測定結果

図 5-13　ダイヤモンドバイトによるβ型チタン合金超精密切削仕上面

[V=60m/min, f=10μm/rev, d=1μm, L=212m]

図 5-13 に，工具送り量 f=10μm/rev で切削距離 L=100m まで切削した超精密切削仕上面の微分干渉顕微鏡写真と WYKO による仕上面粗さの測定結果を示す．図 5-13(a) からわかるように，工作物表面には，工具送り量の 10μm 間隔で規則正しく刻まれた条痕が確認され，結晶粒はほとんど観察されない．また，図 5-13(b)に示すように，3 次元仕上面粗さは，$Hr_{(3D)}$=49nm(Rz)程度である．2 次元仕上面粗さは，図 5-13(c)に示すように，送り方向仕上面粗さで Hr=25nm(Rz)あり，切削方向仕上面粗さでは，$Hr_{(cut)}$=11nm(Rz)程度である．

図 5-14 に，工具送り量 f=10μm/rev で切削した場合の切削距離と得られた仕上面粗さの関係を示す．図より，切削距離 L=21,000m でも，2 次元仕上面粗さ Hr=50nm(Rz) 程度を維持できているのがわかる．この結果から，f=10μm/rev の場合，粒界段差の生成が小さく，加えて，仕上面粗さへの工具摩耗の影響も小さいため，切削距離 L=21,000m まで切削を行っても良好な切削状態を維持し得ると考えられる．

本章では，ダイヤモンドバイトの超精密切削加工において，工具切込み量を d=1μm と小さく設定して，その検討を行っている．工具切込み量が切削時に作用する切削分力に対して及ぼす影響を検討するために，六角形型弾性リング動力計を用いて主分力と背分力の測定を行った [14]．β型チタン合金をダイヤモンドバイトにより超精密切削した際に生じる主分力および背分力を測定した結果は図 5-15 に示される．工具切込み量 d=5μm で加工した際の主分力および背分力は，図 5-15 左図に示すようにそれぞれ，2.0N および 2.5N 程度であり，わずかではあるが主分力よりも背分力が大きいことが確認できる．一方，図 5-15 右図に示すように工具切込み量 d=1μm で加工した際は，それぞれ 0.6N および 0.8N 程度であり，d=5μm の場合と同様に背分力が大きくなっている．各条件の主分力および背分力を比較すると，工具切込み量を 5μm から 1μm と小さくすることで，各方向成分の抵抗が 30%程度まで減少している．形状が整ったダイヤモンド工具を用いて，工具切込み量を小さく設定して加工を行うことで，より正確な形状の切りくずを排出する加工を行うことができると考えられる．その結果，各方向成分の抵抗が小さくなり，それに加えて主分力と結晶粒界段差に大きく影響する背分力がほぼ同程度になることで，結晶粒の弾性回復力が減少し，仕上面における粒界段差が減少したと考えられる．

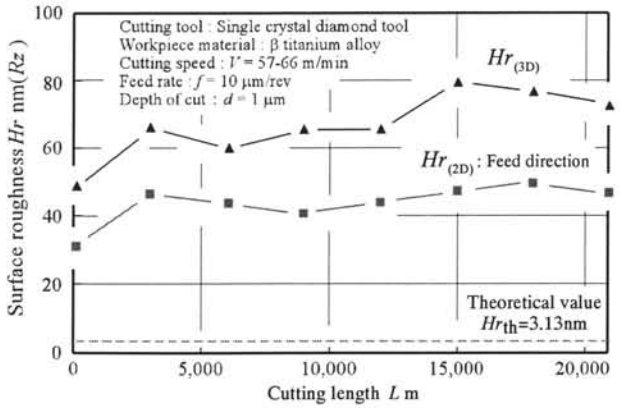
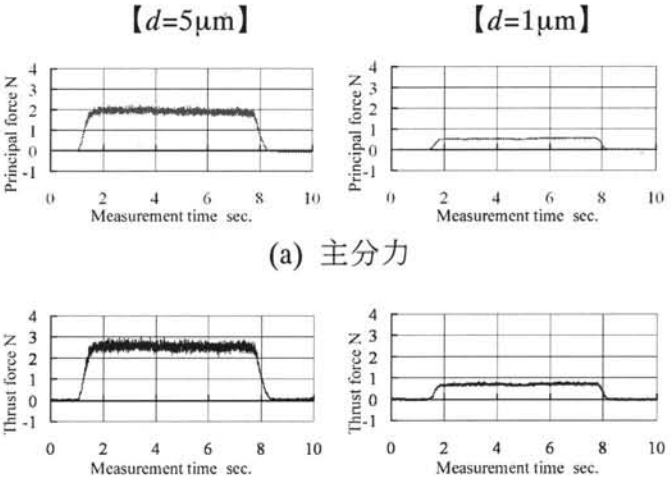


図 5-14　ダイヤモンドバイトによるβ型チタン合金超精密切削における切削距離と仕上面粗さの関係
（工具送り量 f=10μm/rev の場合）



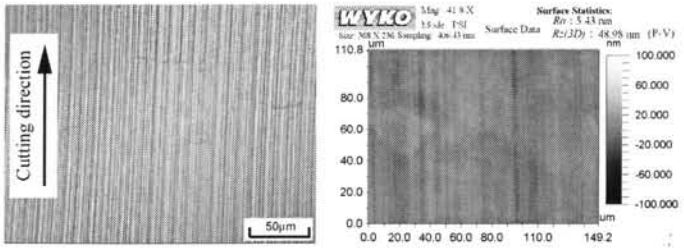
(a) 主分力

(b) 背分力

図 5-15　ダイヤモンドバイトを用いたβ型チタン合金超精密切削における工具切込み量による主分力および背分力の比較
[V=60m/min, f=50μm/rev, d=1μm, L=100m]

結晶粒界段差が減少して Hr=100nm(Rz)を下回る仕上面粗さが得られる工具切込み

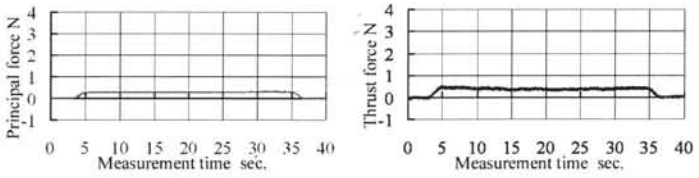
量 d=1μm の条件で，工具送り量を f=10μm/rev と小さく設定して加工して得られた微分干渉顕微鏡写真および WYKO 測定結果を図 5-16 に示す．仕上面には，図 5-16(a)に示すように送り量の 10μm 間隔で刻まれた切削条痕が確認できる．仕上面粗さは，図 5-16(b)に示すように 3 次元仕上面粗さ $Hr_{(3D)}$=49nm(Rz)であり，3 次元仕上面粗さにおいて 100nm(Rz)を下回る超平滑化された仕上面が得られた．



(a)超精密切削仕上面　　(b)WYKO 3 次元測定結果

図 5-16　工具送り量 f=10μm/rev によるダイヤモンドバイト超精密切削仕上面

[V=60m/min, f=10μm/rev, d=1μm, L=100m]



(a)主分力　　(b)背分力

図 5-17　工具送り量 f=10μm/rev で加工時の主分力および背分力

[V=60m/min, f=10μm/rev, d=1μm, L=100m]

加工中に生じた主分力および背分力は図 5-17 に示される．どちらの抵抗においても 0.5N 以下であり，図 5-15 に示される工具送り量 f=50μm/rev の場合と比較して，加工中の切削力が大きく減少していることがわかる．したがって，工具切込み量および工具送り量を小さく設定することで，加工中に生じる背分力を著しく減少させることができた[15), 16)]．その結果，チタン合金の超精密切削加工において，100nm(Rz)程度の結晶粒界段差を減少させることが可能となり，より平滑化された仕上面を得ることができると考えられる．

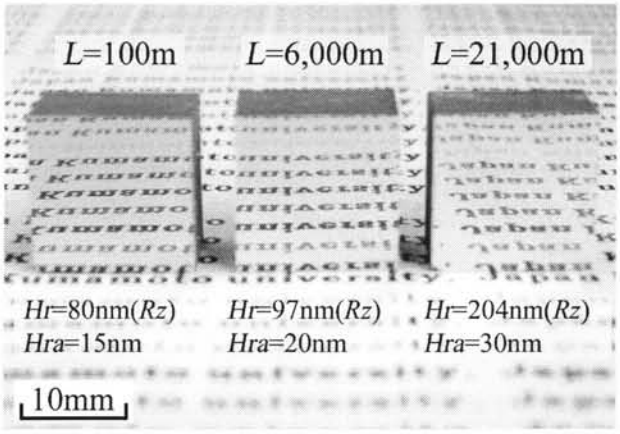


図 5-18　ダイヤモンドバイトによるβ型チタン合金超精密切削仕上面の切削距離での比較

[V=60m/min, f=50μm/rev, d=1μm]

図 5-18 に，ダイヤモンドバイトを用いて，切削距離を変えて 16mm 角のβ型チタン合金を超精密切削した仕上面外観を示す．切削条件は，工具切込み量 d=1μm，工具送り量 f=50μm/rev で，切削距離は L=100m，6,000m，21,000m である．全ての仕上面において，下面に置かれた文字が明瞭に映る鏡面切削が行われているの

が確認できる．切削距離 L=21,000m における仕上面と 100m，6,000m の仕上面を比較すると，21,000m における仕上面は，仕上面粗さが Hr=200nm(Rz)程度まで大きくなっているために，わずかに映りが悪い鏡面となっている．しかしながら，これらの仕上面は，本実験条件の工具送り量 f=50μm/rev では，40 秒程度で切削されることから，難削材であるチタン合金を比較的長い切削距離においても良好な仕上面を効率的に製作できると言え，工具切込み量を 1μm と小さく設定することで工具摩耗が減少した影響は大きい[24]と考えられる．

5.4 小　括

本章では，ダイヤモンドバイトを用いたチタン合金の超精密切削加工の可能性を再検討するために，工具切込み量を d=1μm と小さく設定した超精密切削加工について検討した．各種パラメータを変えて定量的に実験を行うことで，明確な切削条件を設定することで，ダイヤモンドバイトの使用が可能になると考えられる．

以下に得られた結果を示す．

(1)工具切込み量を d=1μm にすると，大きな工具送り量 f=50μm/rev においても切削距離 L=6,000m 程度まで，仕上面粗さを Hr=100nm(Rz)以下に，また，L=15,000m 程度まで Hr=200nm(Rz)以下にすることができる．工具送り量 f=10μm/rev にすると，切削距離 L=20,000m 以上にわたり，Hr=50nm(Rz)以下の仕上面粗さが得られる．

(2)工具送り速度を遅くすると仕上面粗さは，ある一定値まで減少する．工具送り量 f=2μm/rev では，工具送り方向の仕上面粗さ Hr=33nm(Rz)程度または Hra=4nm(Ra)以下の超平滑面を得ることができる．

(3)ダイヤモンドバイトの摩耗は，非常に鋭利に成形された工具刃先に生じるチタン合金の凝着の影響を受けて，極初期過程での初期摩耗が大きくなる．それ以降は，切削距離の増加とともに漸増していく．

(4)工具摩耗の過程で，切れ刃先端半径方向粗さと丸味半径は増加する．平滑で鋭利な状態のダイヤモンドバイト刃先に粗さが生じ，丸味半径が生じることで，超精密切削加工現象が変化し，β型チタン合金の結晶粒界段差が大きくなり，それに伴って仕上面粗さが大きくなる．

(5)工具切込み量を d=1μm と小さくすることで主分力および背分力が減少し，結晶粒界段差が減少した仕上面が得られた．工具送り量を小さくすることで，さらに切削抵抗は小さくなる．その結果，コーティングバイトでは形成することができなかった，より平滑化された仕上面を得ることができた．

【参考文献】

1) 沢田潔，河合知彦，竹内芳美，佐田登志夫：超精密マイクロ溝加工の研究，日本機械学会論文集（C編），(1998)，Vol. 64，No. 627，pp. 332

2) 前田真児，竹内芳美，沢田潔，河合知彦，佐田登志夫：非回転工具を用いた超精密マイクロ溝の創生，精密工学会誌，(2000)，Vol. 66，No. 9，pp. 1456

3) J. Schmütz　E. Brinksmeier　E. Bischoff：Sub-surface deformation in vibration cutting of cupper，Precision Engineerring，(2001)，Vol. 25，No. 3，　pp. 218

4) Daniel Grimme, Werner Preuss, Ekkard Brinksmeier: Machining of hard coatings in optical qualoty，Proceeding of American Society of Precision Engineering 2003，(2003)，Vol. 19

5) 古沢利明，日野裕，中村示，辻新次：チタンアルミナイド金属間化合物の高精度切削加工，日本機械学会論文集（C編），(1998)，Vol. 64，No. 624，pp. 407

6) 吉川昌範，鈴木郁男，鈴木数夫ほか，ダイヤモンドツール，日経技術図書株式会社，(1987)，No. 1，pp. 31

7) Ekkard Brinksmeier, Ralf Gläbe：Precision machining of steel with ultrasonically chilled diamond tools, Proceeding of American Society of Precision Engineering 2002, (2002), Vol. 17，pp. 275

8) 社本英二，鈴木教和，森脇俊道，直井嘉和：楕円振動切削加工法（第4報）—工具振動制御システムの開発と超精密切削への適用—，精密工学会誌，(2001)，Vol. 67，No.11，pp. 1871

9) 森脇俊道，社本英二，井上健二：ステンレス鋼の超精密超音波振動切削加工の研究，精密工学会誌，(1991)，Vol. 57，No. 11，pp. 1983

10) 鈴木教和，樋野励，益田真輔，社本英二：超硬合金の超精密楕円振動切削加工—延性モード切削機構の検討—，精密工学会誌，(2005)，Vol. 72，No. 4，pp. 539

11) 安井平司，古野達也：超精密切削抵抗測定技術の開発，2005年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集，(2005)，pp. 1145

12) 安井平司，坂本重彦，川田昌樹：チタン合金のコーティング工具による超精密切削加工，精密工学会誌，(2002)，Vol. 68，No. 7，pp. 928

13) 安井平司，遠藤貴徳，近藤純久，黒田龍一：超精密切削における仕上面粗さの実験的解析 —無酸素銅の場合—，日本機械学会九州支部熊本地方講演会講演論文集（1996），pp. 193

14) 坂本重彦，安井平司，篠崎烈：ダイヤモンドバイトによるチタン合金の超精密切削抵抗の検討，2005年度 精密工学会九州支部鹿児島地方学術講演会講演論文集，(2005)，pp. 51

15) 篠﨑烈，坂本重彦，安井平司：ダイヤモンドバイトによるチタン合金の超精密切削の試み，精密工学会誌，(2006)，Vol. 72，No. 12，pp. 1505

16) Shigehiko SAKAMOTO, Akira SHINOZAKI, Heiji YASUI: Possibility of Ultra-Precision Cutting of Titanium Alloy with Diamond Tool, Proc. of American Society for Precision Engineering 20th Annual Meeting, (2005), pp. 427

第6章　チタン合金に対する超精密非球面金型加工の試み

6.1　緒　言

前章までの検討において，チタン金属の超精密切削加工では，コーティングバイトを用いて，仕上面粗さ Hr=100nm(Rz)程度の良好な鏡面を加工し得ることがわかった[1]．このことは，単結晶ダイヤモンドバイトを用いた超精密切削加工と比較して，比較的低コストにチタン金属の超平滑面を形成できることを意味する．また，比較的長い切削距離においても高精度な仕上面状態を維持できると考えられる．このような加工技術を用いて，平面のみならず曲面，さらには非球面形状を加工することで，より実用的な工業製品の加工を実現できると考えられる．

近年の光学機器の応用範囲は，従来のカメラや顕微鏡などにとどまらず，光ディスクシステム，レーザー光学系，内視鏡を代表とする医療機器分野など，さまざまな方面に広がっている．これらの非球面レンズは，プラスチックや樹脂などを用いて射出成形法により，現在では比較的容易に製造されるようになった．しかし，非球面レンズの有用性が古くから知られていながら実用化に至らなかった理由は，非球面のような複雑形状を鏡面状態の仕上面粗さと同時に高精度の形状精度を満足するような加工およびその測定法が確立しなかったからである[2]．さらには，チタン金属やステンレス鋼などの難削材に対する加工技術では，研削や研摩加工による仕上加工が必要となり，加工精度とコストを考えると，実用化に至るような技術がなかったと考えられる．

しかしながら，本研究において，超精密切削加工のみで鏡面となる仕上面を加工し得る技術を見出したことから，非球面形状を加工することで，その有用性が，さらに高くなると考えられる．化学的・機械的特性に優れるチタン金属の需要が増している現在では，より高能率に部品を加工できれば，加工コストが安く抑えられ，その需要もさらに増大すると推測できる．

このようなことから，本章では，コーティングバイトを用いて，α-β型チタン合金に対して非球面超精密切削加工を行い，超精密非球面金型の製作を試みた．各種非球面形状の中から放物線形状を選定し，直径 50mm の工作物において全面が鏡面となり，像のゆがみのない非球面を有する非球面金型を製作することを目標として，その加工技術の検討を行っている．

本章で得られた結果は，これまで行ってきたチタン金属の超精密切削加工技術に関する検討事項の実加工例であり，コーティングバイトを用いた超精密切削加工が，有用であることを，さらに詳細に証明できると考えられる．

6.2　実験装置および加工条件

本章では，コーティングバイトを用いたチタン金属の超精密非球面金型加工について検討した．工作機械には，超精密旋盤（東芝機械　ULC-100A）を使用して超精密正面旋削加工で行った．超精密旋盤に取り付けた工作物および切削工具，切削油剤供給装置などの実験外観を**図 6-1** に示す．また，**表 6-1** に非球面超精密切削加工条件を示す．本超精密切削加工実験では，直径ϕ50mm，厚さ t=10mm のα–β型チタン合金に対して，端面部分を非球面切削する正面旋削で行った．加工に用いた切削工具は，コーティングバイトである．切削油剤は不水溶性切削油剤を使用した．工具送り方向から圧縮空気と共に切削点近傍にミスト供給し，加工点の冷却と切りくずの除去を行った．

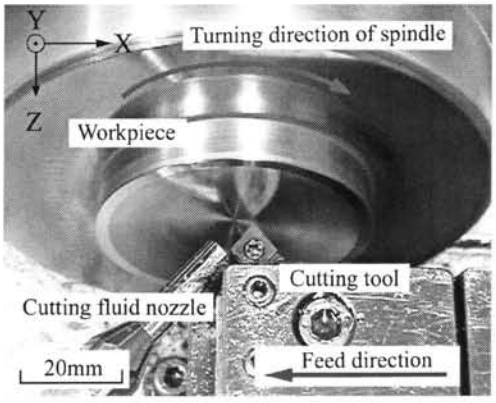


図 6-1　超精密切削加工の外観

表 6-1　超精密切削加工実験条件

Machine tool: Ultra-precision Lathe ULC-100A, Toshiba Machine CO., LTD.	
Cutting tool:	Coated-cemented-carbide tool
	Nose radius: 0.4 mm
	Rake angle: 0 deg
	Relief angle: 7 deg
Workpiece material:	α–β titanium alloy (Ti-6Al-4V)
Cutting fluid:	Water-immiscible type cutting fluid (Type Y)
Cutting conditions	Cutting speed : V = 0 - 157 m/min
	Depth of cut: d = 5 μm
	Feed rate: f = 2 μm/rev
	Cutting length : L = 982 m

非球面超精密切削加工条件において，切削速度は直径 50mm の工作物全面を加工するため，V=0-157m/min である．工具切込み量は d=5μm，主軸 1 回転あたりの工具送り量は f=2μm/rev と固定して非球面加工を行った．なお，本検討では，工具送り量 f=2μm/rev で加工したので，切削距離は L=1,000m 程度になる．

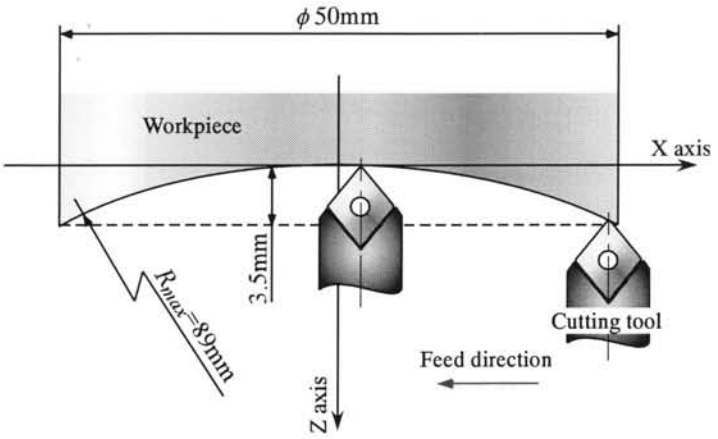
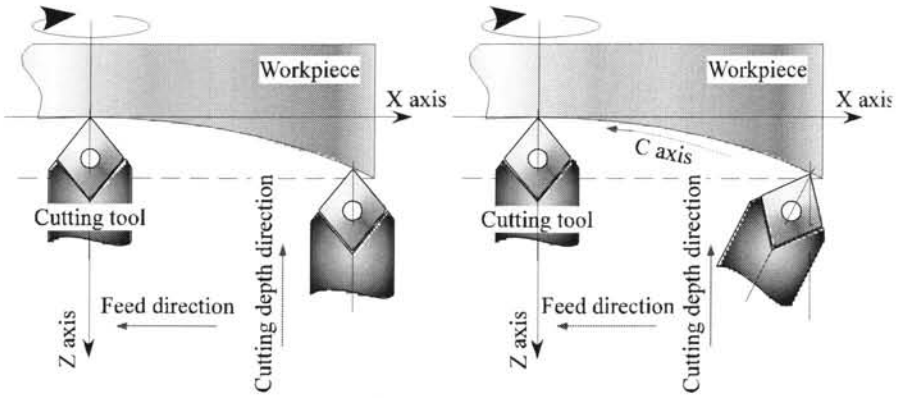


図 6-2　非球面金型形状の詳細

図 6-2 に，本検討で加工した非球面形状の詳細を示す．直径 50mm のα–β型チタン合金に対して，放物線形状の非球面超精密切削加工を行う．放物線の最大高低差は 3.5mm，最小極率半径は R=89mm となるように決定した．



(a)XZ 2 軸同時制御方式　　(b)XZC 3 軸同時制御方式

図 6-3　非球面超精密切削のための工作機械制御方式

非球面超精密切削加工は非常に複雑なため数値制御を用いた加工が必要であり，2 軸同時制御および 3 軸同時制御による方法が実用化されている．各制御方式を図示したものを図 6-3 に示す．本検討では，比較的制御が容易な 2 軸同時制御による非球面加工を行った．図 6-3(a)に示すように被削材に対して，超精密旋盤の制御方向である X 軸および Z 軸を制御して加工を行う方法である．図 6-3(b)に示す 3 軸同時制御による加工では，工具刃先での切削点が加工中に変化しないように，C 軸により工具または工作物を旋回させる方法である．いずれの加工法においても非球面形状は，パーソナルコンピュータで座標計算を行い，DNC を介して超精密旋盤の制御盤に転送されて加工される．

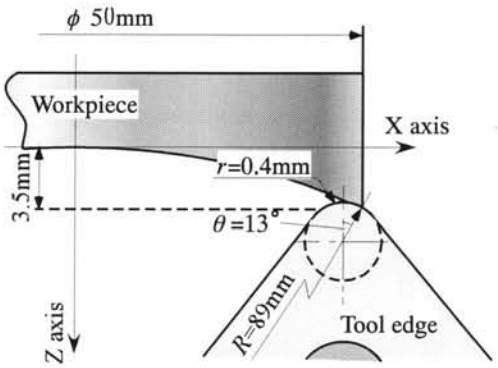


図 6-4　非球面切削の工具位置関係

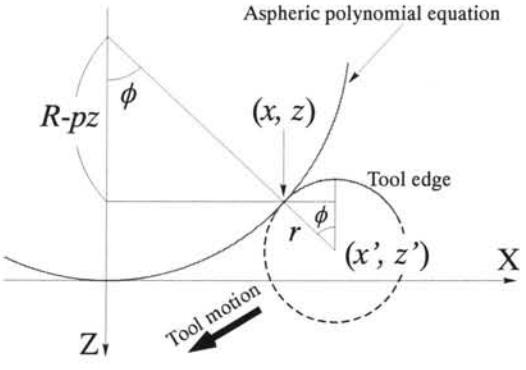


図 6-5　2 軸制御による刃先半径補正

実際の加工においては，図 6-4 に示すように非球面の曲線を X 軸方向に 100μm 間隔に等分割し，その区間を直線近似させて行った．このように，実際の工作機械の動作は，点と点の間では非球面曲線からわずかにずれた軌跡を通ることになる．つまり，運動分解能がより小さい工作機械による加工が，設計した形状との誤差を小さくする

1 つの要因となる[3), 4)]．また，2 軸同時制御による非球面形状の加工では，切削点が場所により異なるため工具性状が非常に重要となる．曲率半径が最小となる工作物端では，工具刃先半径 r=0.4mm，切込み量 d=5μm で加工した場合，刃先接触角は約 13°となり，工具と被削材の接触弧長さは 123μm 程度となる．同様の加工条件で平面切削した場合の接触弧長さは 63μm 程度であり，非球面切削した場合は 2 倍程度まで広くなると考えられる．

本検討では，超精密旋盤を用いた 2 軸同時制御による非球面形状の加工を採用し，刃先が丸いコーティングバイトを用いる．そのため，非球面形状における実際の工具軌跡は，非球面多項式[5), 6)]と，次式により工具刃先の半径分を補正したものになる．

$$x' = x + r * \sin\Phi \qquad (6\text{-}1)$$

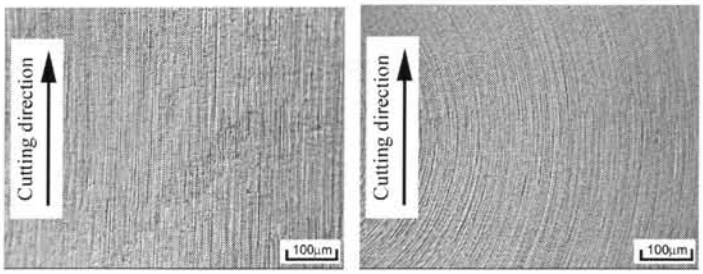
$$z' = z + r * \cos\Phi \qquad (6\text{-}2)$$

図 6-5 に示されるように，非球面多項式で得られる軌跡の座標を（x，z）とすると，式（6-1），(6-2）で補正を行うことで，座標を（x’，z’）とすることができる．このような補正を行うことで，より高い形状精度で加工することができる．

6.3　実験結果および考察

6.3.1　コーティングバイトによるチタン合金非球面超精密切削仕上面

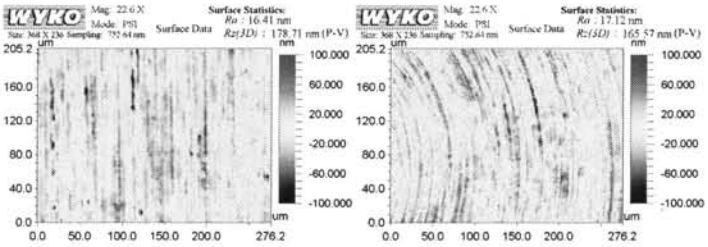
図 6-6 に，コーティングバイトを用いて，α–β型チタン合金を非球面超精密切削して得られた工作物の微分干渉顕微鏡写真を示す．なお，測定箇所は，仕上面中心から 20mm および 5mm となる箇所である．切削距離は，それぞれ L=355m, 940m である．切削距離 L=355m における仕上面は図 6-6(a)に示すように，活性なチタンの付着物 [7]によると思われる凹凸が一部に確認されるが，中心付近の仕上面と同様に切削条痕が観察される良好な仕上面となった．切削距離 L=940m となる箇所の仕上面は図 6-6(b)に示すように，切削条痕が観察される一様で良好な仕上面となった．



(a) L=355m　　(b) L=940m

図 6-6　α–β型チタン合金非球面超精密切削仕上面の加工部による比較

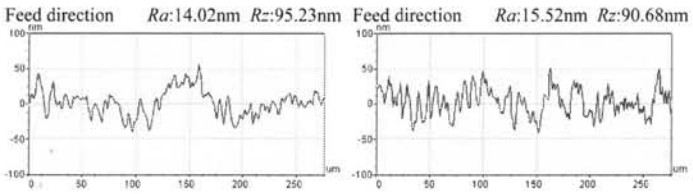
[V=0-150m/min, f=2μm/rev, d=5μm, L=982m]



(a) L=355m　　(b) L=940m

図 6-7　α–β型チタン合金非球面超精密切削仕上面の WYKO 3 次元測定結果

[V=0-150m/min, f=2μm/rev, d=5μm, L=982m]



(a) L=355m　　(b) L=940m

図 6-8　α–β型チタン合金非球面超精密切削仕上面の工具送り方向仕上面粗さ

[V=0-150m/min, f=2μm/rev, d=5μm, L=982m]

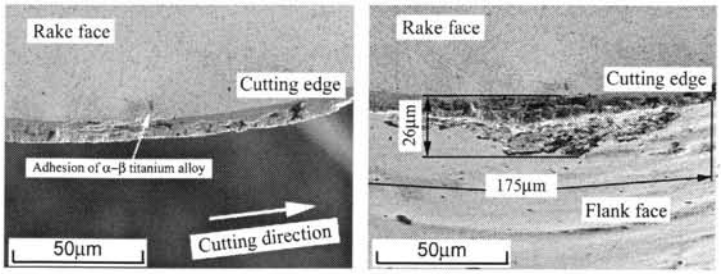
これらの非球面加工された仕上面を WYKO で測定した結果を**図 6-7** に示す．仕上面粗さは，図 6-6 に示す仕上面を□200×270μm の領域で測定した WYKO 測定像からわかるように，切削距離 L=355m の箇所において 3 次元仕上面粗さ $Hr_{(3D)}$=179nm(Rz)程度，算術平均粗さ Hra=16nm 程度，L=940m の箇所において $Hr_{(3D)}$=166nm(Rz)程度，Hra=17nm 程度と，ほぼ同程度であり，比較的良好な仕上面が加工できたと言える．

図 6-8 に，工具送り方向に 270μm 長で評価した 2 次元仕上面粗さを示す．これらの仕上面粗さを比較すると，切削距離 L=355m の位置において Hr=95nm(Rz)，L=940m 付

近の仕上面では Hr=91nm(Rz)とほぼ同程度の仕上面粗さとなった．また，算術平均粗さはどちらの位置においても Hra=15nm 程度であり，非球面レンズや金型の精度の基準となる Hra=10nm にはわずかに及ばないが，超精密切削加工により比較的平滑化された非球面形状が得られた．これらの結果をみると，コーティングバイトを用いた平面切削における加工結果と同程度の仕上面であることがわかる．このことは，前述したように，切削点が常に変化する 2 軸同時制御方式において，常に新しい状態のバイト刃先が加工を行っていることになり，切削距離は L=1,000m 程度になるが，比較的短い切削距離における仕上面と同様の状態になることを示す．したがって，工具送り方向の仕上面粗さで Hr=100nm(Rz)を下回る超平滑面が得られたと考えられる．

6.3.2　非球面超精密切削加工による工具摩耗の影響

図 6-9 に，α–β型チタン合金を非球面超精密切削する際に使用したコーティングバイトの刃先稜 SEM 観察像を示す．工具すくい面では図 6-9(a)に示すように，被削材であるα–β型チタン合金の凝着が観察される．また，8μm 程度の厚さを持つコーティング層の領域が大きく摩耗している．この摩耗は，図 6-9(b)に示す刃先稜逃げ面の SEM 観察像より V_b=26μm 程度の摩耗幅で生じているのが確認される．通常の端面切削を行った場合の工具摩耗よりも，非常に大きく広い範囲にわたって摩耗している．実際の長さを測定してみると，逃げ面摩耗の長さは 175μm となり，前述した図 6-4 から算出される理論接触弧長さ 123 μm よりも 50 μm 程度大きくなっている．

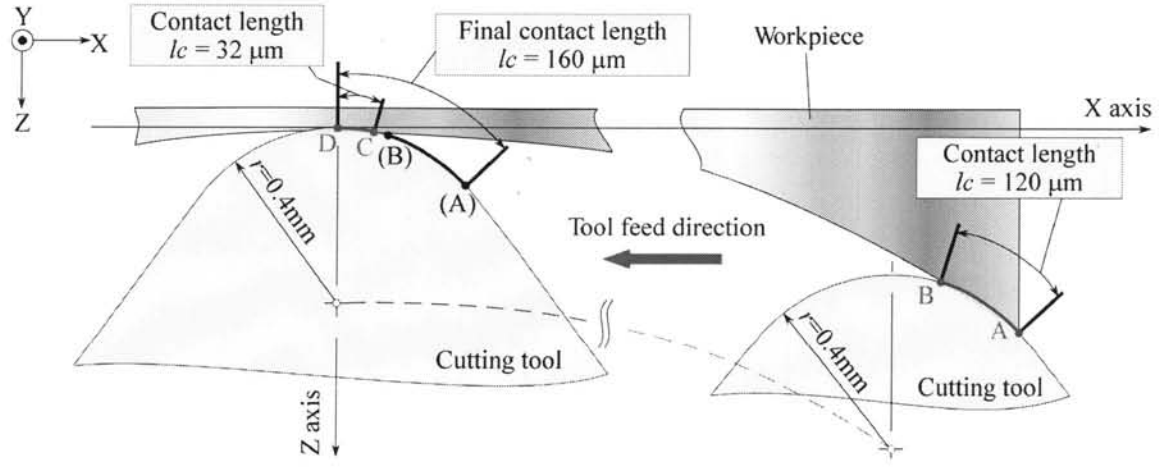


(a) すくい面　　(b) 逃げ面

図 6-9　α–β型チタン合金の非球面超精密切削に用いたコーティングバイト刃先摩耗

[V=0-150m/min, f=2μm/rev, d=5μm, L=982m]

図 6-10 に，非球面超精密切削加工における仕上面とバイト刃先の接触位置関係を図解したものを示す．非球面形状を加工する場合は，切削点が常に変化する [3), 4), 6)]．加工を開始する工作物端においては，図 6-10(b)に示すように，最も曲率半径が小さく，R=89mm 程度になるため工具先端よりも工具送り方向とは逆の部分 A-B 領域が接触す



[Position A: x = 0]　　[Position B: x = 25]

(a) 工作物中央付近（r=0mm）　　(b) 工作物端付近（r=25mm）

図 6-10　非球面超精密切削における仕上面とバイト刃先の接触位置関係

[V=0-150m/min, f=2μm/rev, d=5μm, L=982m]

る．A 点の座標を（X_A，Z_A）として非球面多項式 [6]で算出すると，（25.00，3.49）となる．加工の進行に伴い曲率半径が大きくなるため接触弧長さは減少するが，実際の切削点は工具先端方向へ移動して C-D 領域となり，その長さは 32μm に達する．したがって，最終的な工具逃げ面摩耗は A-D 領域で生じ，D 点の座標を（X_D，Z_D）とすると（0.00，0.00）となるため，幾何学的な接触弧は 160μm である．したがって，実際の摩耗は，最大理論接触弧長さよりも広い範囲にわたって生じていることになる．つまり，工作物端では，整った形状の刃先により切りくずが排出されるが，加工の進行により切りくずを生成する箇所が摩耗した刃先部分から，加工されていない新しい刃先部分に移ることになり，最終的に良好な仕上面を形成していると考えられる．したがって，図 6-6 および図 6-7 に示した微分干渉顕微鏡写真および WYKO 像より，金型としての仕上面粗さを満たす加工が行われていることから，普通切削に用いるコーティングバイトにおいても，非球面形状超精密切削加工が可能であると考えられる．

非球面超精密切削して得られたα–β型チタン合金の非球面金型を**図 6-12 左図**に示す参考までに同条件で加工した SUS316 の非球面金型を右図に示す．難削材である両材料の仕上面においても非球面形状の鏡面加工が行われており，手前に置かれた切削工具の拡大された虚像が写映されている．拡大された工具の像を見ると，工作物端と中心付近における像が同様に明確であることから，超精密切削による非球面加工が全面に渡って良好に行われたことが確認できる．直径 50mm の工作物に対する仕上加工時間は僅か 15 分程度であり，比較的短時間に良好な仕上面を有する超精密非球面金型の製作が実現できた．

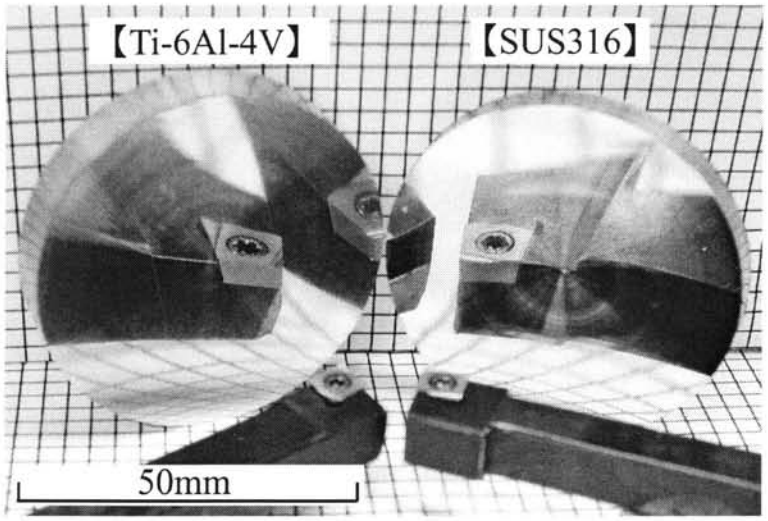


図 6-12　α–β型チタン合金およびステンレス鋼 SUS316 の非球面超精密金型

[V=0-150m/min，f=2μm/rev，d=5μm，L=982m]

6.4　小　括

本章では，普通切削に用いられるコーティングバイトを用いて，α–β型チタン合金に対する超精密非球面金型加工を実験的に検討した．放物線形状を加工することにより，コーティングバイトによるチタン金属の超精密切削加工が，より実用的な加工技術であることを確認することができた．

以下に検討した結果を示す．

(1)チタン金属の非球面超精密切削加工において，コーティングバイトを用いて平滑性の高い非球面形状の加工を行うことができた．α–β型チタン合金では 2 次元仕上面粗さ Hr=100nm(Rz)よりも良好な仕上面となり，明瞭な虚像を映し出す鏡面を加工することに成功した．

(2)非球面超精密切削加工中は，工具刃先の切削点が常に変化するため，最大理論接触長さよりも広い領域に渡って逃げ面摩耗を生じることがわかった．

(3)2 軸同時制御法による非球面形状の超精密切削加工では，工具刃先の切削点は変化するが，工作物の外周から加工を始めた場合，新しい刃先方向へ切削点が移動するため，最終的な仕上面粗さは，未使用バイトで加工した場合と同程度のものが得られるということが確認された．

【参考文献】

1) 安井平司，坂本重彦，川田昌樹：チタン合金のコーティング工具による超精密切削加工，精密工学会誌，(2002)，Vol. 68，No. 7，pp. 928
2) 庄司克雄：超精密加工と非球面加工，株式会社　エヌ・ティー・エス，(2004)，pp.219
3) 坂本重彦，安井平司，篠﨑烈，コーティング工具による難削材超精密非球面金型製作の試み，2005 年度 精密工学会春季大会学術講演会講演論文集，(2005)，pp. 801
4) 坂本重彦，安井平司，篠﨑烈，難削材に対する非球面超精密切削加工法の検討，精密工学会九州支部　宮崎地方講演会講演論文集，(2004)，pp. 45
5) CNC 超精密加工機自動プログラミング装置 SPCNC 取扱説明書，豊田工業㈱
6) Shigehiko SAKAMOTO, Heiji YASUI, Akira SHINOZAKI: Manufacturing of the Aspheric Stainless Steel Die by Ultra-Precision Turning Using Coated-Cemented-Carbide-tool, Proc of 5th euspen International Conference - Montpellier -France-, (2005), pp. 603
7) 坂本重彦，安井平司，篠﨑烈：チタン合金の超精密切削仕上面粗さに及ぼす不働態皮膜の影響，2004 年度 精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集，(2004)，pp. 429

第7章　総　括

7.1　本研究の成果と概要

本論文では，物理的・化学的性質に優れ，近年，生体材料や金型材料としての用途が注目されているチタン金属の超精密切削加工技術について，より実用的な技術を見出すことを目的として実験的に考究した．一般に難削材といわれるチタン金属やステンレス鋼，焼入れ鋼などの難削材に対する超精密切削加工に関する研究は，一部の研究者や企業によって行われており，いずれの検討結果においても，ナノメートルオーダーの加工技術として確立されるような段階に至っていないのが現状である．そこで，本研究では，ナノメートルオーダーの仕上面粗さ，具体的には 100nm(*Rz*)以下に高平滑化された仕上面を形成することを目標とした．

本研究で行ったチタン金属に関する超精密切削加工に関する検討結果を以下に示す．

第2章「バイト材種が超精密切削仕上面粗さに及ぼす影響」では，チタン金属の超精密切削加工において，各種工具材種が超精密切削仕上面粗さに及ぼす影響を検討した．軟質材料の超精密切削加工において高精度な仕上面が得られる単結晶ダイヤモンドバイトをはじめ，通常の金属加工に用いられる超硬バイト，サーメットバイト，コーティングバイトの4種類のバイトを用いて，仕上面粗さ *Hr*=100nm(*Rz*)以下の超精密切削仕上面を得ることが目的である．検討した結果，工具切込み量 5μm の加工条件で単結晶ダイヤモンドバイトを用いると非常に短い切削距離で工具摩耗が大きくなり，仕上面粗さ *Hr*=300nm(*Rz*)を越える仕上面となる．サーメットバイトおよび超硬バイト，コーティングバイトを用いて同様の加工条件で超精密切削したところ，コーティングバイトが，最も有用であるということを確認した．

第3章「工具切込み量が超精密切削仕上面粗さに及ぼす影響」では，加工条件の一つである工具切込み量が，超精密切削仕上面粗さに及ぼす影響を検討した．β型チタン合金の超精密切削加工において，前加工における工具切込み量は仕上面粗さに影響することを確認した．前加工切込み量を小さくすることによって加工変質層を薄くし，平滑化された仕上面を得ることができた．さらに，仕上加工切込み量を小さくすると結晶粒界段差が大きく減少し，仕上面粗さ *Hr*=100nm(*Rz*)以下の仕上面が得られることを確認した．小さな工具切込み量にすることで，切削抵抗が小さくなり，粒界段差を減少させることができることを示した．

第4章「低切削速度が超精密切削仕上面粗さに及ぼす影響」では，切削過程における工具摩耗は，高い切削温度が影響しているという観点から，切削温度上昇抑制に大きな影響を持つと考えられる低切削速度の効果を検討した．極低切削速度 *V*<1m/min で超精密切削した場合，100nm を越える粒界段差が小さくなり，仕上面粗さ *Hr*=84nm

(*Rz*)程度の仕上面が得られた．極低切削速度では，工具摩耗が減少するとともに，切削抵抗が小さくなるため，切削速度が速い場合には得られなかった *Hr*=100nm(*Rz*)以下の仕上面粗さの生成が可能となる．さらには，切削速度 60m/min では得ることが難しい仕上面粗さ *Hr*=100nm(*Rz*)を切削距離 4km まで可能であることを実証した．

第 5 章「ダイヤモンドバイトによる低切込み超精密切削加工の検討」では，従来の加工条件では，工具摩耗が大きくなるために加工し得なかったダイヤモンドバイトによるチタン金属の超精密切削加工の検討を行った．ダイヤモンドバイトの摩耗に影響する発生熱が小さい低切込みでの可能性を考え，従来行われていた工具切込み量 5μm よりも小さい 1μm で加工している．その結果，工具摩耗は大幅に低減した．また，コーティングバイトでは，仕上面粗さが悪化するため，従来の加工条件として採用し得なかった工具送り量 10μm/rev での切削が可能となり，仕上面粗さも 100nm(*Rz*)以下になることを示した．さらに工具送り量を小さくすると，仕上面粗さ 50nm(*Rz*)以下が得られることも見いだした．工具送り量 *f*=10μm/rev では，従来よりも長い切削距離 *L*=20,000m 以上にわたって *Hr*=50nm(*Rz*)以下の仕上面粗さが得られることを実験的に証明した．

第 6 章「チタン合金に対する超精密非球面金型加工の試み」では，前章までに検討してきた技術を基礎として，コーティングバイトを用いたチタン金属の超精密非球面金型製作を試みた．コーティングバイトを用いることで，直径 50mm のα–β型チタン合金を仕上面粗さ 91nm(*Rz*)，算術平均粗さ 16nm(*Ra*)程度の明瞭な虚像を映し出す鏡面加工することに成功した．

以上，本論文では，純チタン，β型チタン合金，α–β型チタン合金などの各種チタン金属に対する超精密切削加工技術について検討した．その結果，普通切削に用いられるコーティングバイトが，チタン金属の超精密切削加工に有用であることがわかった．コーティングバイトで仕上面粗さ *Hr*=100nm(*Rz*)以下の仕上面を加工することは可能である．しかし，さらなる高平滑面を得るためには，コーティングバイトでは限界がある．そこで，工具切込み量を小さく設定して単結晶ダイヤモンドバイトを用いることで，さらなる高精度仕上面を形成することができる．本論文では，チタン金属に対する超精密切削加工技術は非常に難しいが，目標とする仕上面性状によって，工具切込み量，切削速度などの超精密切削加工に関わる要素を適切に決定することが重要であることを確認し，明らかにした．

本論文で得られた成果は，難削材であるチタン金属に関する検討であり，より高品位に，かつ高平滑に加工する技術の一検討である．本研究は，今後，チタン金属の用途が広がることで，超精密切削加工技術がさらに必要となり，より実用的な加工技術として確立されるための一考察になるものと確信している．

謝　辞

本論文は，筆者が 2002 年 4 月に熊本大学　工学部　知能生産システム工学科　知能機械製作学分野に配属され，2004 年 10 月に大学院博士後期課程に進学してから現在までの 6 年間に，熊本大学 安井平司教授の御懇篤なる御指導のもとに完成することができました．本課程での 3 年間を含む 6 年間に，御懇篤なる御指導を賜わるとともに，本論文の主査をして頂きました安井平司教授に心から御礼申し上げます．

また，本論文を完成させるにあたり，御多忙中にも関わらず非常に有益な御教示，御助言を賜わりました熊本大学　渡邉純二教授，原田博之教授，峠睦教授に謹んで御礼申し上げます．

学部 4 年次からの 6 年間にわたり，研究およびその発表等に関するまで，多くの事柄において，親身になって御指導をいただきました坂本重彦准教授に，心から御礼申し上げます．また，研究等に際して良き御教示を頂きました久保田章亀助教，実験機器等の製作協力を頂きました古庄周市氏ならびに熊本大学工学部中央工場の皆様に御礼申し上げます．

筆者が 6 年間にわたりこの研究を遂行できたのも知能機械製作学分野（安井研究室）の方々の御協力に負うところが多く，皆様には貴重なご意見を頂きました．特に本研究を始めたばかりの頃に，互いに相談し合いながら一緒に研究に取組んだ花岡俊作君，樋脇孝平君に心から感謝いたします．また，熊本大学安井研究室卒業生，栗林将司君，神谷隆仁君，新開隆史君，林洋史君，古野達也君，梶原憲介君，和佐野克明君，遠山朗君，梶原祐介君，川林毅春君をはじめとする研究室の皆様には本研究にあたり熱心な御協力を頂きました．ここに記して厚く御礼申し上げます．

筆者は，2005 年 4 月に有明工業高等専門学校機械工学科に着任し，社会人博士課程学生として研究に取組んで参りました．本論文完成までの過程において尾﨑龍夫校長をはじめとする教職員の皆様，特に川嵜義則学科長をはじめとする機械工学科教職員の皆様には，多大なるご理解とご協力を頂きました．心より感謝申し上げます．

そして，実験機材を御提供頂きました，ユシロ化学工業㈱，㈱UEX，大同特殊鋼㈱，㈱アライドマテリアル，㈱タンガロイ，東芝機械㈱の各社に心から感謝致します．

終わりに，上記の方々の御教授と御鞭撻なくしては，本研究は完成しなかったことを記し，あらためて心より御礼申し上げます．